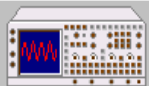


本章将介绍频率、相位、电压、电流以及阻抗等电参量的测量方法。

在现代检测技术中，各种类型的被测量的测量，多是直接或通过各种传感器、电路等转换为与被测量相关的电压、电流、频率等电学基本参量后进行检测 and 处理的。

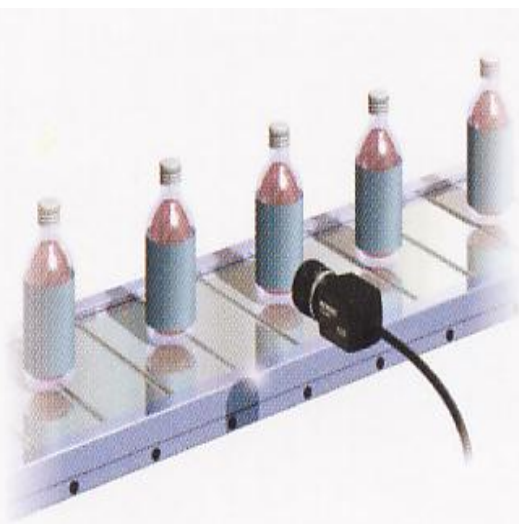
便于对被测量的检测、处理、记录和控制，又能提高测量的精度。



检测技术在工业生产领域的在线检测：零件尺寸、产品缺陷、装配定位.....

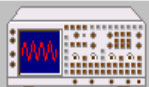


检查轴承 / 滚珠是否脱漏



检查容器内的液位





2. 1频率、时间和相位的测量

广西大学电气工程学院

时间是国际单位制中七个基本物理量之一，单位是秒（s）。

频率以单位时间内周期性振荡的次数计量，单位是赫 [兹]（Hz）。

相位（单位deg）是描述交流信号的三要素之一。相位差的测量是研究信号、网络特性的不可缺少的重要方面。

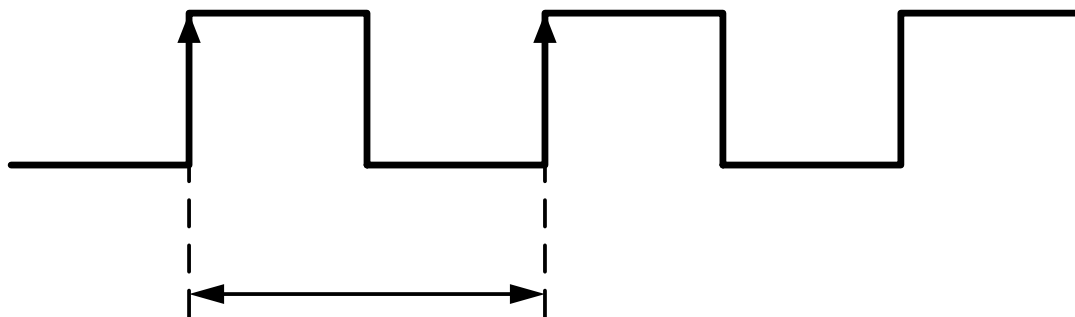
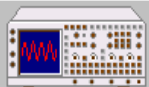


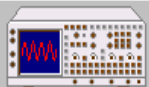
图2.1 周期T计算示意图



测量时间和频率的重要性

准确测量时间和频率是十分重要的，在当代高科技应用中显得尤为重要。

例如，邮电通信，大地测量，地震预报，人造卫星、宇宙飞船、航天飞机的导航定位控制等。

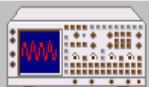


在工业生产领域中周期性现象十分普遍，如各种周而复始的旋转运动、往复运动，各种传感器和测量电路变换后的周期性脉冲等。

周期性过程重复出现一次所需要的时间称为周期，用符号T表示。

周期与频率互为倒数关系

$$f = \frac{1}{T} \quad (2-1)$$



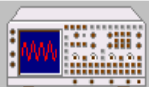
2. 1. 1 频率的测量

频率测量技术常将一些非电量或其他电参量转换成频率进行测量，以提高测量的精度。

频率测量方法分为：计数法和模拟法两类

计数法：测量精度高、操作简便，可直接显示数字，便于与微机结合实现测量过程自动化，应用最为广泛；

模拟法因为简单经济，在有些场合仍有应用。



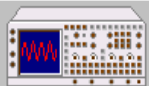
1. 频率（周期）的数字测量

(1) 计数法测量原理

计数法就是在一定的时间间隔 T 内，对周期性脉冲的重复次数进行计数。

若周期性脉冲的周期为 T_A ，则计数结果为

$$N = \frac{T}{T_A} \quad (2-2)$$



2. 1. 1 频率的测量

计数法原理如图2-1(a)所示，周期为 T 的脉冲

①加到闸门的输入端，宽度为 T 的门控信号。

②加到闸门的控制端控制闸门的开、闭时间，只有在闸门开通时间 T 内闸门才输出计数脉冲。

③到十进制计数器进行计数。在闸门打开前计数器先清零，闸门关闭时，计数器的计数值 N 由 T 和 T_A 决定。如果 T 和 T_A 一个为已知标准量，另一个为待测量，则从计数值 N 和已知标准量便可求得。

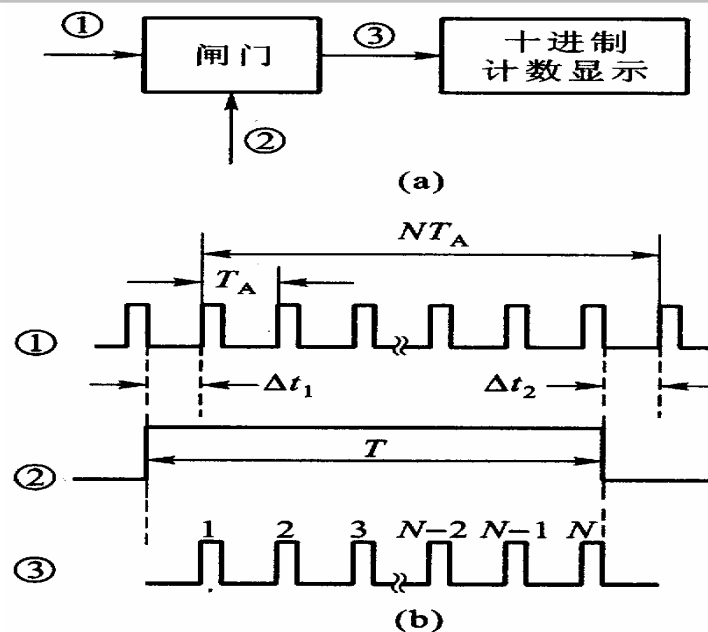


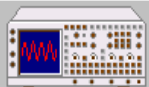
图 2 - 1 计数法测量原理

播放

闸门

十进制
计数显示

停止

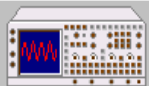


由于 T 和 T_A 两个量是不相关的， T 不一定正好是 T_A 的整数 N 倍，即 T 与 NT_A 之间有一定误差，如图2-1(b)所示。图中 Δt_1 ，是闸门开启时刻至第一个计数脉冲前沿的时间（假设计数脉冲前沿使计数器翻转计数）， Δt_2 是闸门关闭时刻至下一个计数脉冲前沿的时间。处在 T 区间内的计数脉冲个数（即计数器计数结果）为 N ，则

$$\begin{aligned} T &= NT_A + \Delta t_1 - \Delta t_2 = \left(N + \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{T_A} \right) T_A \\ &= (N + \Delta N) T_A \end{aligned} \quad (2-3)$$

式中

$$\Delta N = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{T_A} \quad (2-4)$$



2. 1. 1 频率的测量

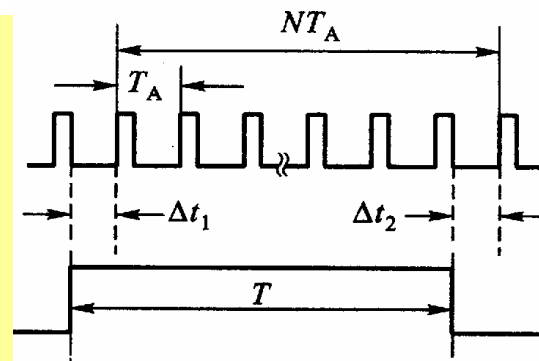
显然, $0 \leq \Delta t_1 \leq T_A, 0 \leq \Delta t_2 \leq T_A$

若 $\Delta t_1 = \Delta t_2$, 则 $\Delta N = 0$;

若 $\Delta t_1 = T_A, \Delta t_2 = 0$, 则 $\Delta N = 1$;

若 $\Delta t_1 = 0, \Delta t_2 = T_A$, 则 $\Delta N = -1$,

因此脉冲计数的最大绝对误差 (又称量化误差) 为



$$\Delta N = \pm 1 \quad (2-5)$$

播放

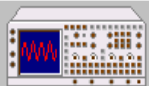
阀门

十进制
计数显示

停止

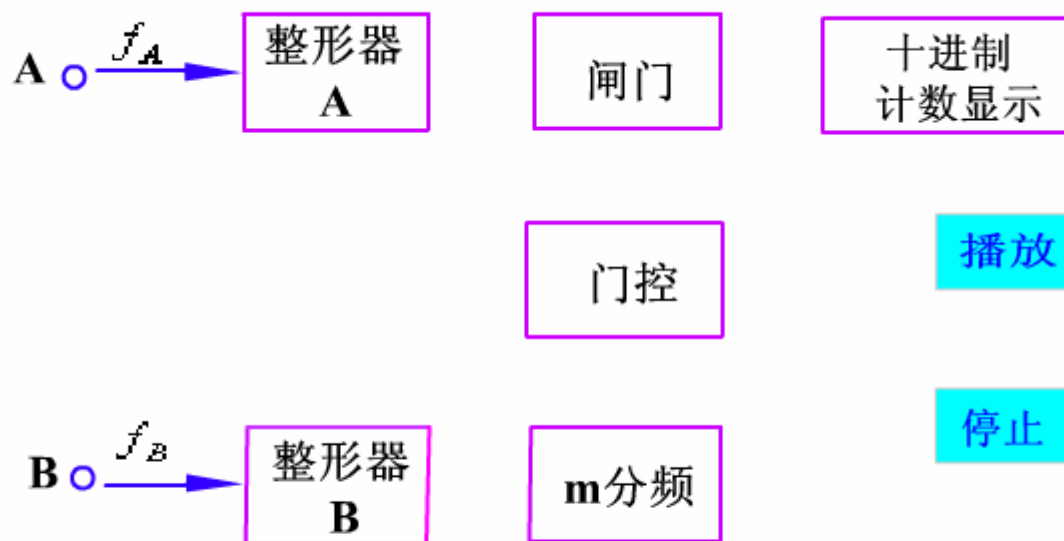
脉冲计数最大相对误差为:

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{N} = \frac{T_A}{T} \quad (2-6)$$

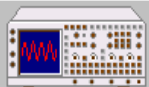


通用计数器

(2) 通用计数器/电子计数器具有测量频率(测频)和测量周期(测周)等测量功能,称通用计数器。通用计数器的基本组成如图所示。



通用计数器的基本组成



频率比测量方式

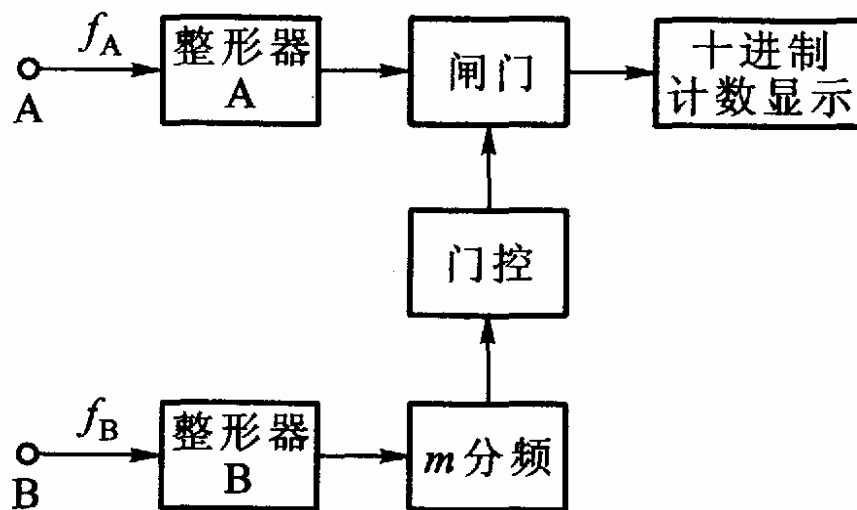
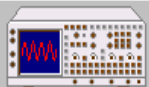


图 2-2 通用计数器的基本组成

$$N = \frac{m T_B}{T_A} = m \frac{f_A}{f_B} \quad (3-7)$$

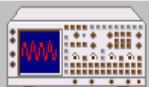


测频方式

将被测信号 f_x 接到图2-2中A输入端（即 $f_A=f_x$ ），晶振标准频率 f_c 信号接到B输入端（即 $f_B=f_c$ ）则称计数器工作在测频方式，此时式（2-7）变为

$$N = \frac{m f_x}{f_c} \quad (2-8)$$

$$f_x = \frac{N f_c}{m} \quad (2-9)$$

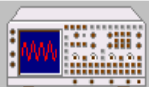


测周方式

将被测信号 f_x 接到图2-2中B输入端（即 $f_B=f_x$ ），晶振标准频率信号接到A输入端（即 $f_A=f_c$ ），称计数器工作在测周方式，式（2-7）变为

$$N = \frac{mf_c}{f_x} = mf_c T_x \quad (2-10)$$

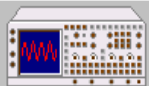
$$T_x = \frac{N}{mf_c} \quad (2-11)$$



(3) 频率（周期）的测量误差与测量范围

周期与频率互为倒数，从理论上讲测量频率与测量周期是等效的。

从实际测量效果来看，图2-2所示通用计数器工作在测频方式和工作在测周方式，在测量误差和测量范围有差别。



① 测频方式

“测频”的相对误差为

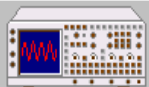
$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta f_c}{f_c} = \frac{1}{N} + \frac{\Delta f_c}{f_c}$$

标准频率的
准确度

测频的最大
相对误差

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left(\frac{f_c}{m f_x} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right) \quad (2-12)$$

结论：被测频率越高，分频系数 m 越大，测频的相对误差越小，即测频的精度越高。



若采用K位十进制计数器，最大允许计数值为

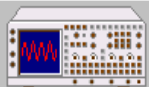
$$N_{\max} = 10^K - 1 \quad (2-13)$$

为使计数器不溢出，最大允许计数值要求

$$N = \frac{mf_x}{f_c} \leq N_{\max}$$

即

$$f_x \leq \frac{N_{\max}}{m} \cdot f_c \quad (2-14)$$



若计数脉冲频率最大允许值为 f_{\max} ，则还要求

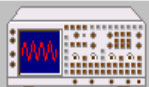
$$f_x \leq f_{\max} \quad (2-15)$$

为满足测量精度 γ ，要求

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} \leq \gamma$$

代入式(2-12)可知， f_x 应满足

$$f_x \geq \frac{f_c}{m \left(\gamma - \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right)} \quad (2-16)$$



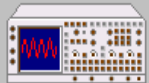
② 测周方式

由式（2-11）可得测周的相对误差为

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \frac{\Delta N}{N} - \frac{\Delta f_c}{f_c} = \frac{1}{N} - \frac{\Delta f_c}{f_c}$$

将式（2-10）代入得测周的最大相对误差为

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \left(\frac{f_x}{m f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right)$$



又因为

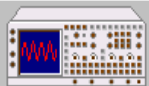
$$T_x = 1 / f_x, \Delta T_x / T_x = -\Delta f_x / f_x$$

故由上式可得测周法测频的最大相对误差为

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \left(\frac{f_x}{m f_c} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right) \quad (2-20)$$

对比式 (2-12)
和式 (2-20) 可见:

直接测频与测周法测频
的相对误差是不一样的。



结论1

若被测频率较高，直接测频的相对误差较小！

若被测频率较低，测周法测频的相对误差较小！

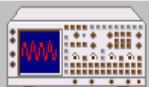
为提高测量精度

中界频率 = 晶振标准频率

结论2

当被测频率高于中界频率时，采用直接测频法测量频率，

当被测频率低于中界频率时应采用测周法测量频率。



2. 频率的模拟测量

(1) 直读法测频

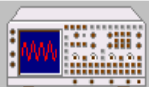
① 电桥法测频

电桥法测频是利用交流电桥的平衡条件和电桥电源频率有关这一特性来测频的。

② 谐振法测频

谐振法利用电感、电容串联谐振回路或并联谐振回路的谐振特性来实现测频。

③ 频率 - 电压 (f/U) 转换法测频



(2) 比较法测频

比较法测频：是用标准频率 f_c 与被测频率 f_x 进行比较；

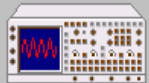
当把标准频率调节到与被测频率相等时指零仪表（零示器）便指零。

此时的标准频率值即为被测频率值。

比较法测频可分为两种

□ 拍频法测频

□ 差频法测频



拍频法测频

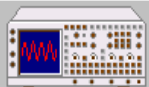
是将待测频率信号与标准频率信号在**线性元件**上叠加产生拍频。

差频法测频

是将待测频率信号与标准频率信号在**非线性元件**上进行混频。

误差讨论

- 拍频法测量频率的**绝对误差**约为零点几赫兹；
 - 差频法测量频率的误差可优于 10^{-5} 量级，最低可测的信号电平达 $0.1\mu\text{V} \sim 1\mu\text{V}$ 。
- 拍频法和差频法在常规场合很少采用。

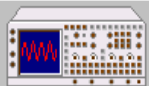


(3) 示波器测量频率

用示波器测量频率有两种方法：

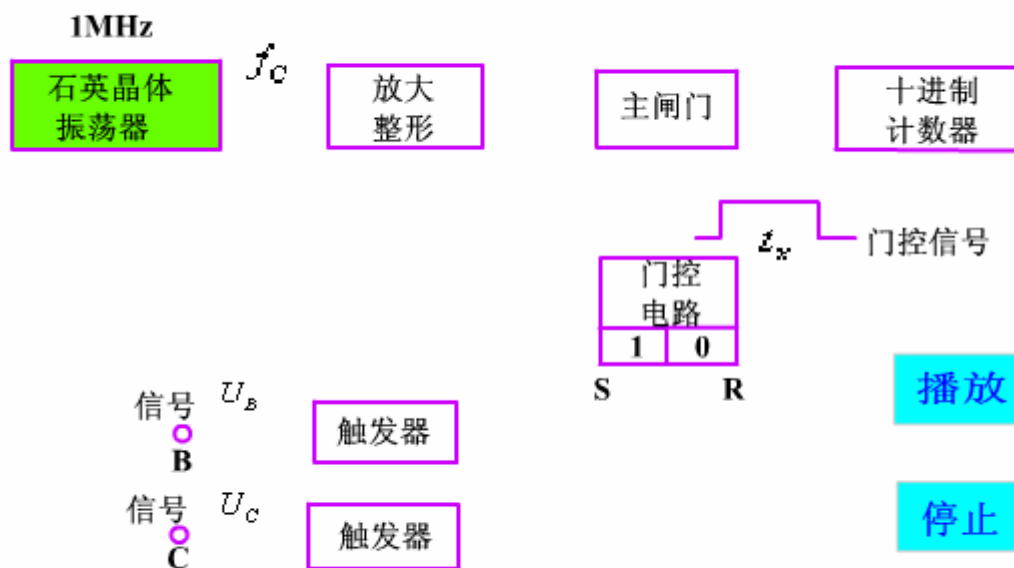
一种是将被测信号加到示波器的Y通道，在荧光屏上测量被测信号的周期。

另一种是将被测信号和标准频率信号分别加到示波器的X通道和Y通道，观测荧光屏上显示的李沙育图形。

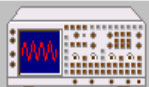


2.1.2 时间间隔的数字测量

时间间隔和周期的测量是测量信号或信号间的时间长度，测量方案基本相同，如图2-3所示。



时间间隔测量原理



2.1.3 相位差的数字测量

测量相位差的方法主要有：

- 用示波器测量；
- 与标准移相器比较（零示法）；
- 把相位差转换为电压来测量；
- 把相位差转换为时间间隔来测量等。

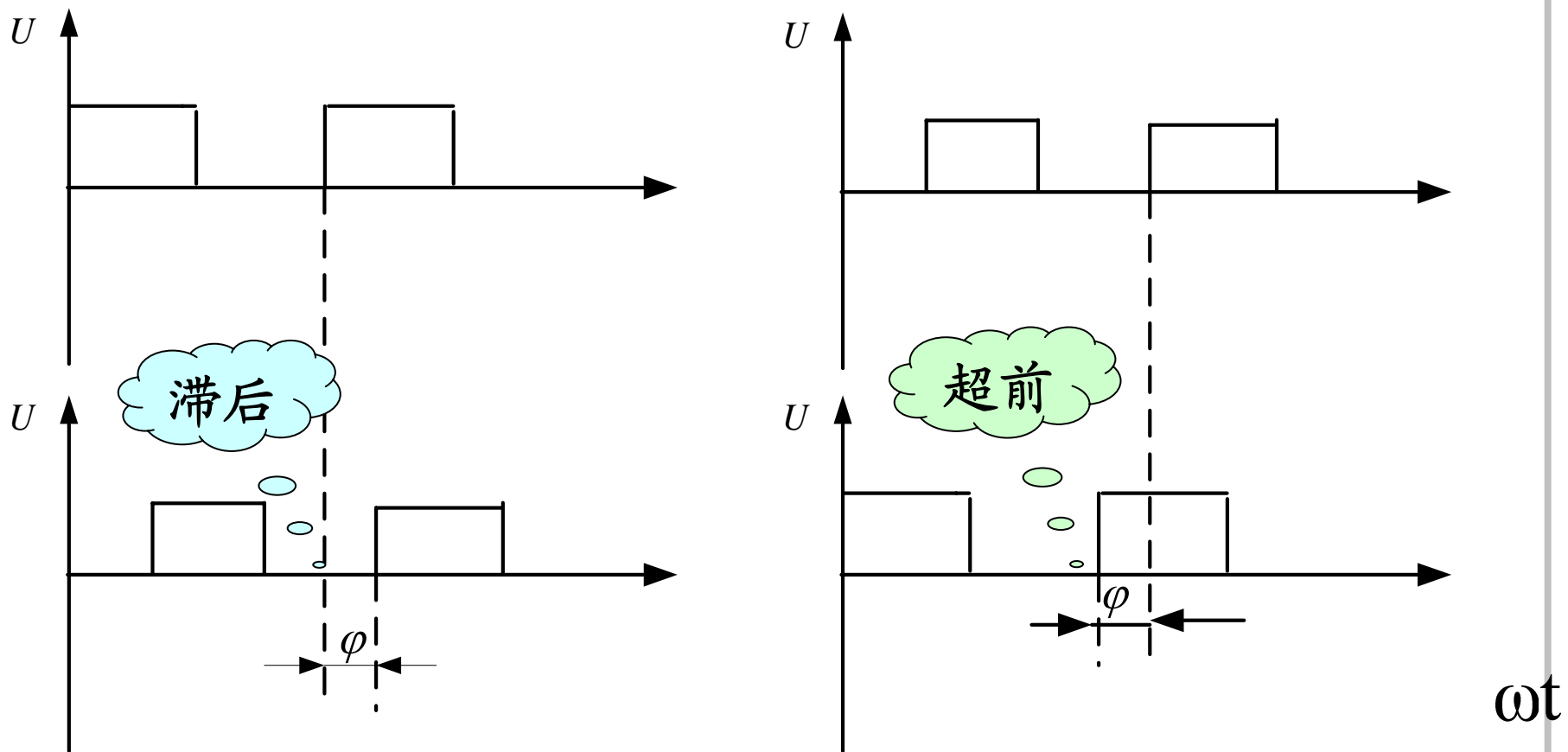
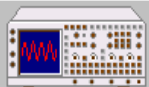


图2.4 滞后和超前两种情况下的相位角

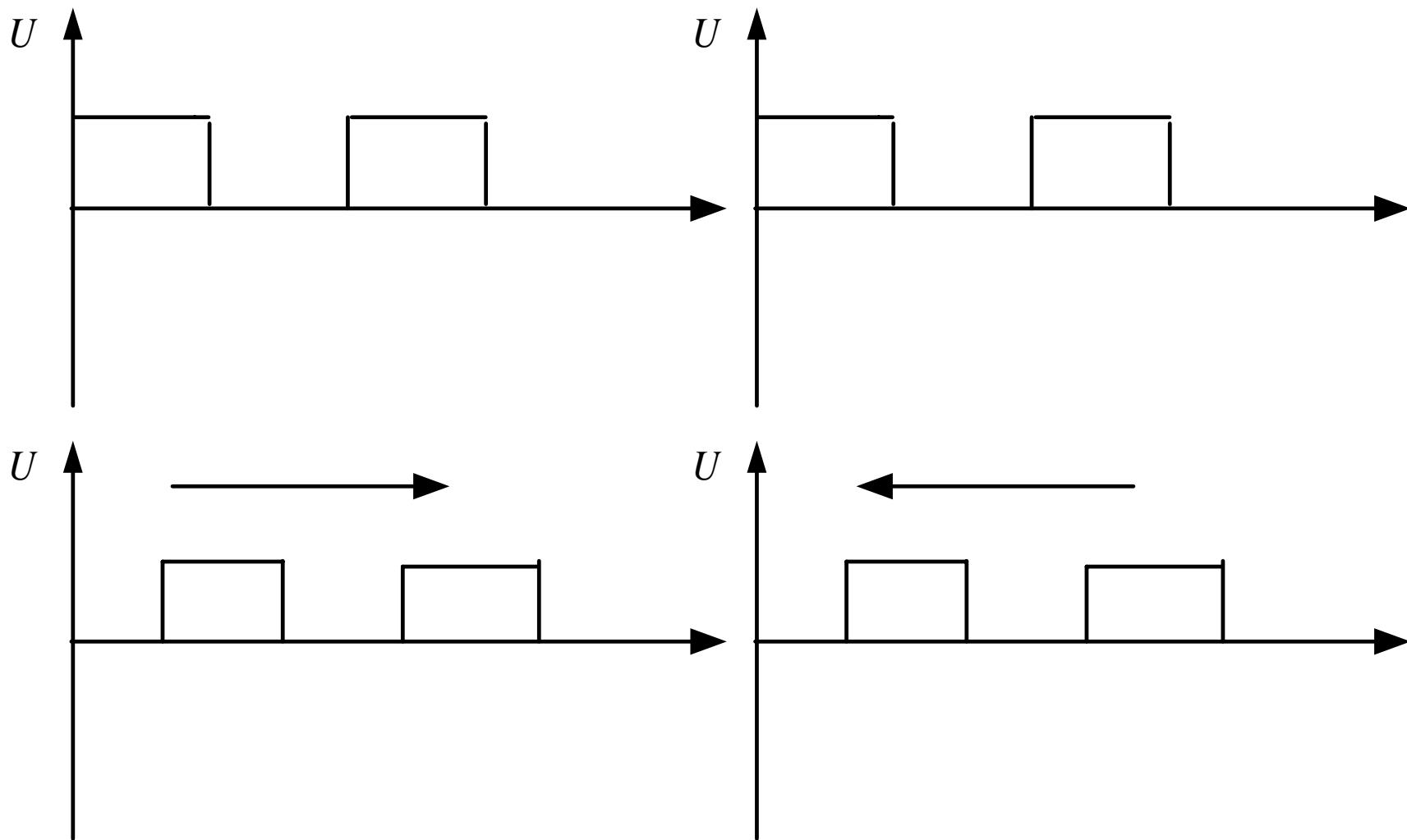
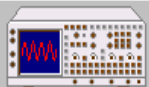
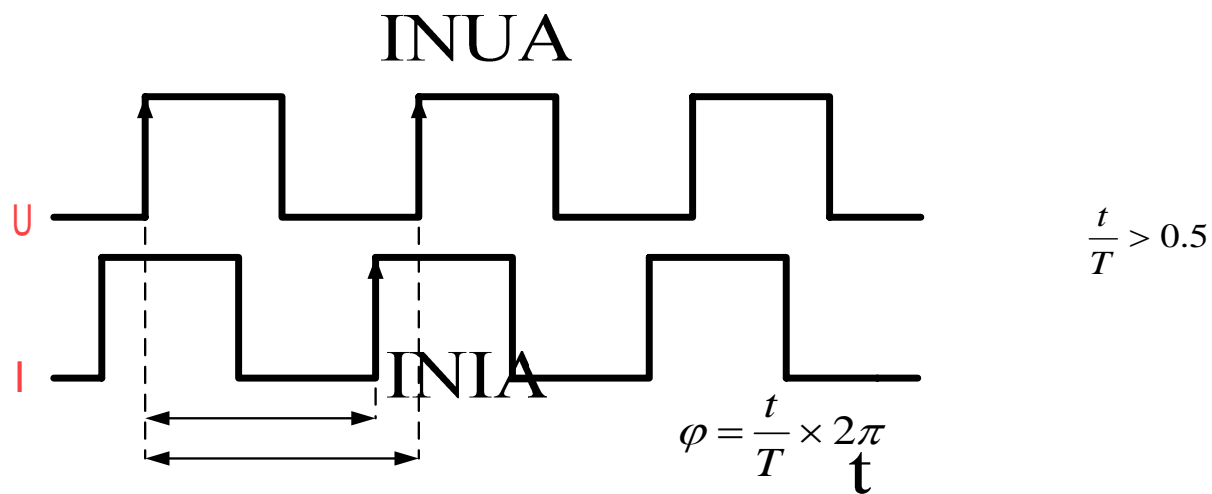
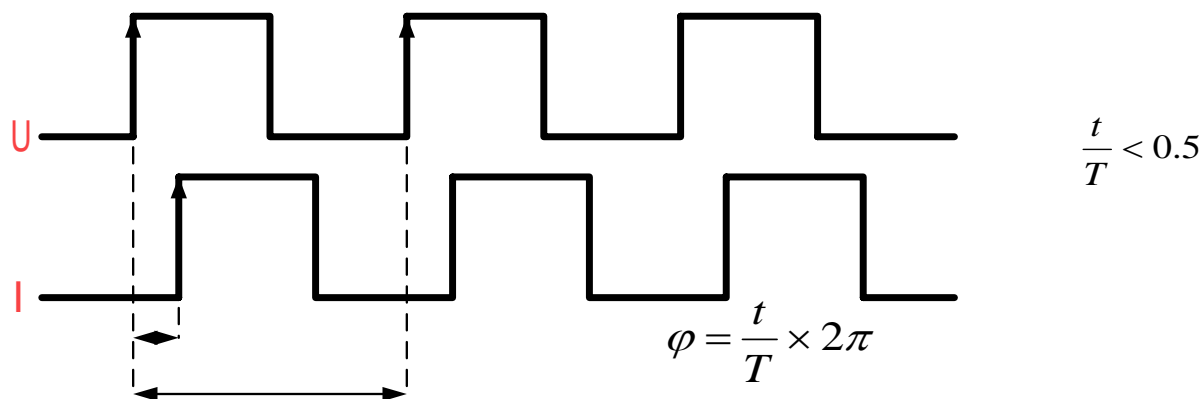
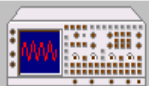
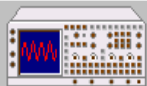


图2.5 频差不同时的相位角移动趋势



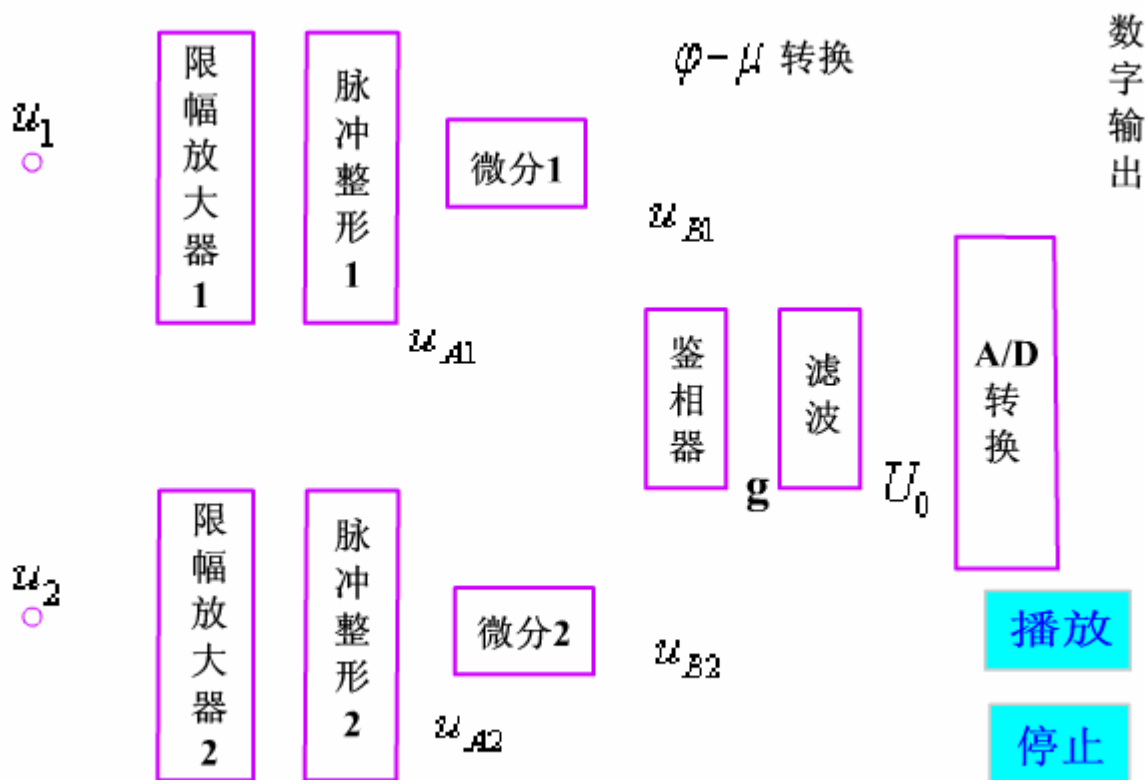
T

使用AVR单片机进行功率因数角采集及判断

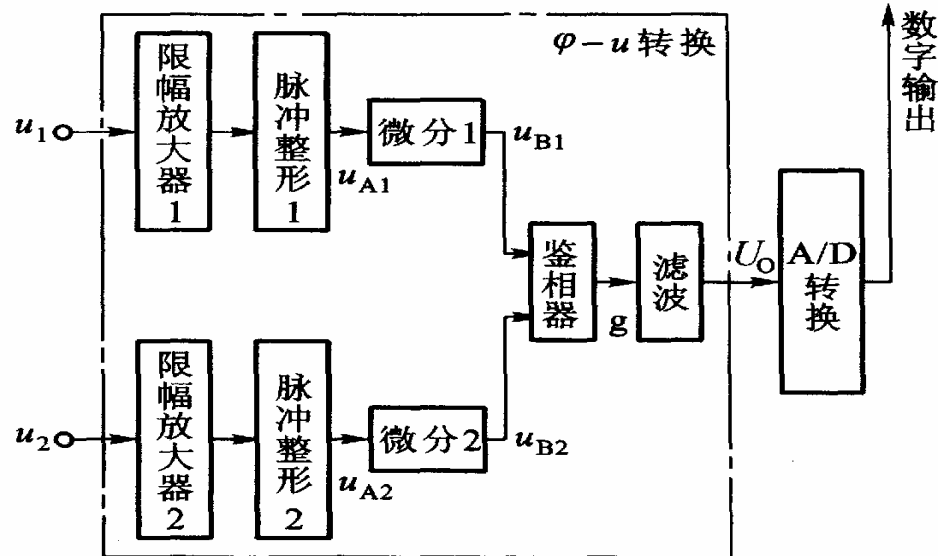
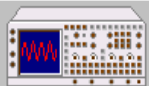


1. 相位-电压转换法

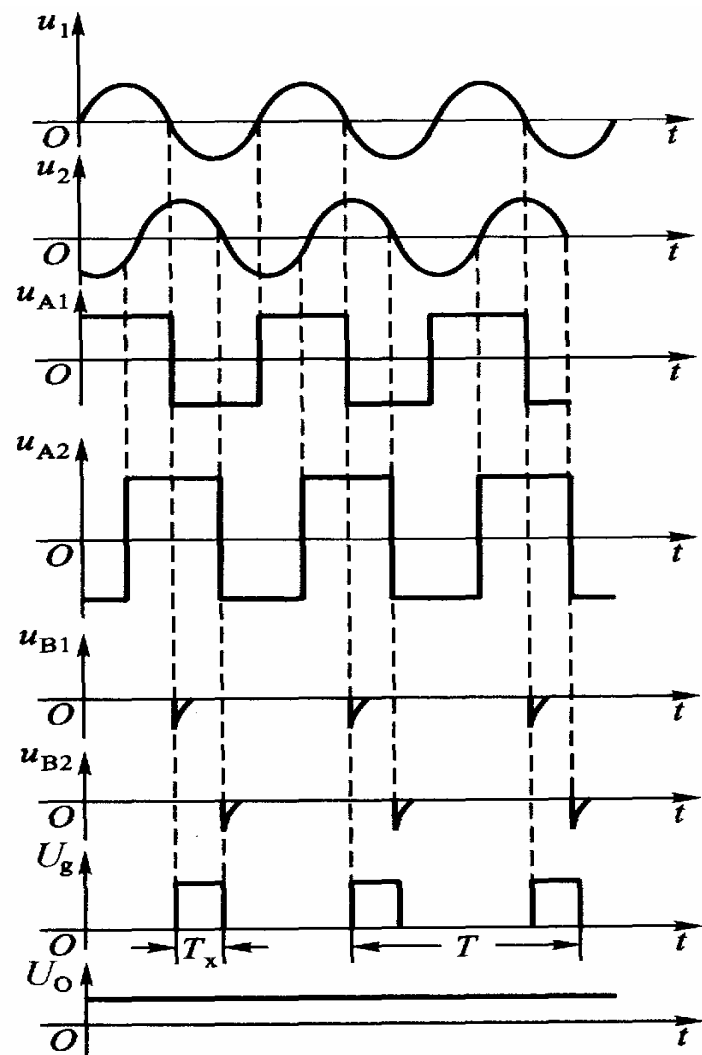
- 相位-电压转换式数字相位计的原理框图如图2-6(a)所示。
- 其各点波形如图2-6(b)所示。



相位-电压转换式数字相位计原理

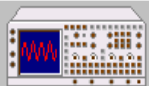


(a) 原理



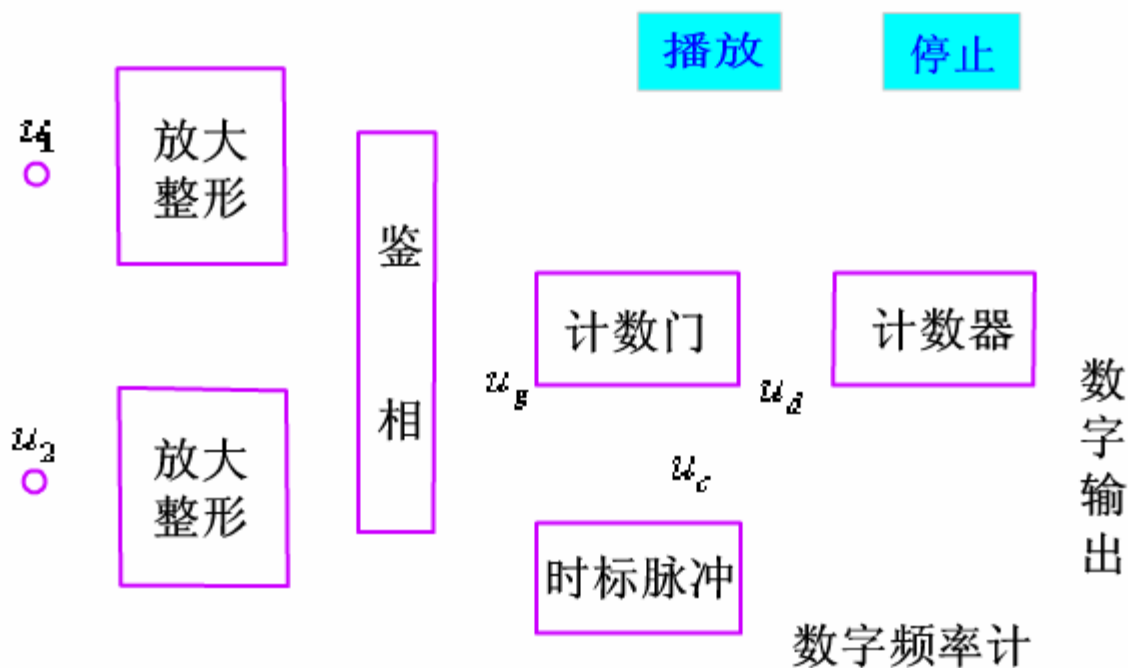
(b) 转换波形

图2-6 相位-电压转换式数字相位计原理



2. 相位-时间转换法

- 将上述相位-电压转换法中鉴相器的时间间隔又用计数法对它进行测量，构成相位一时间转换式相位计，如图2-5所示。



相位一时间转换式相位计原理图

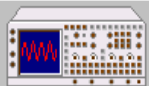
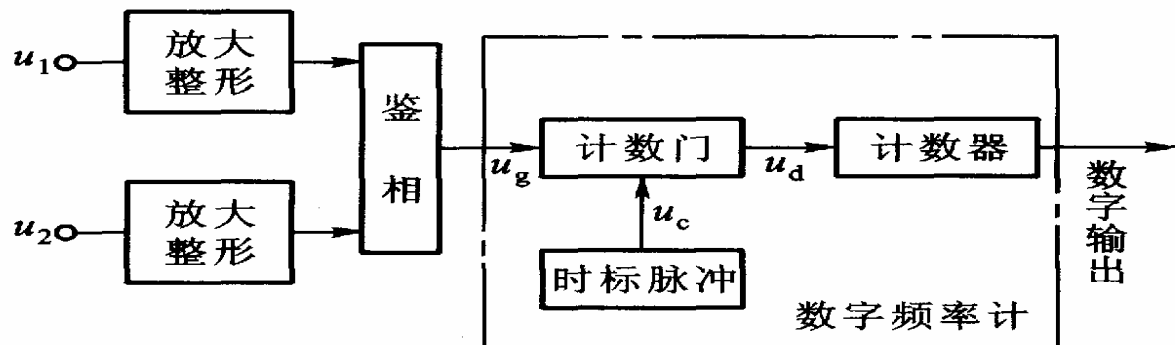
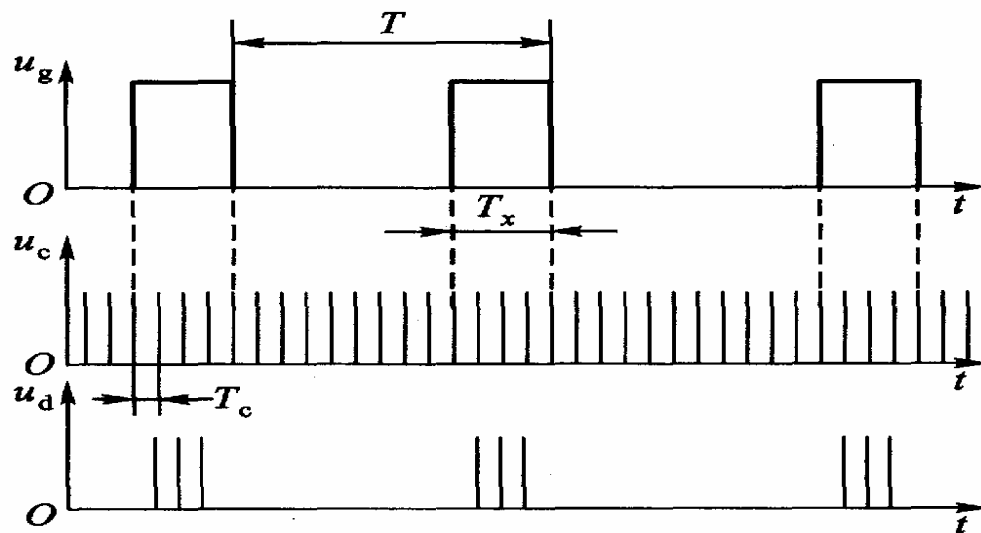


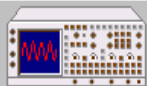
图2-7 相位—时间转换式相位计原理图



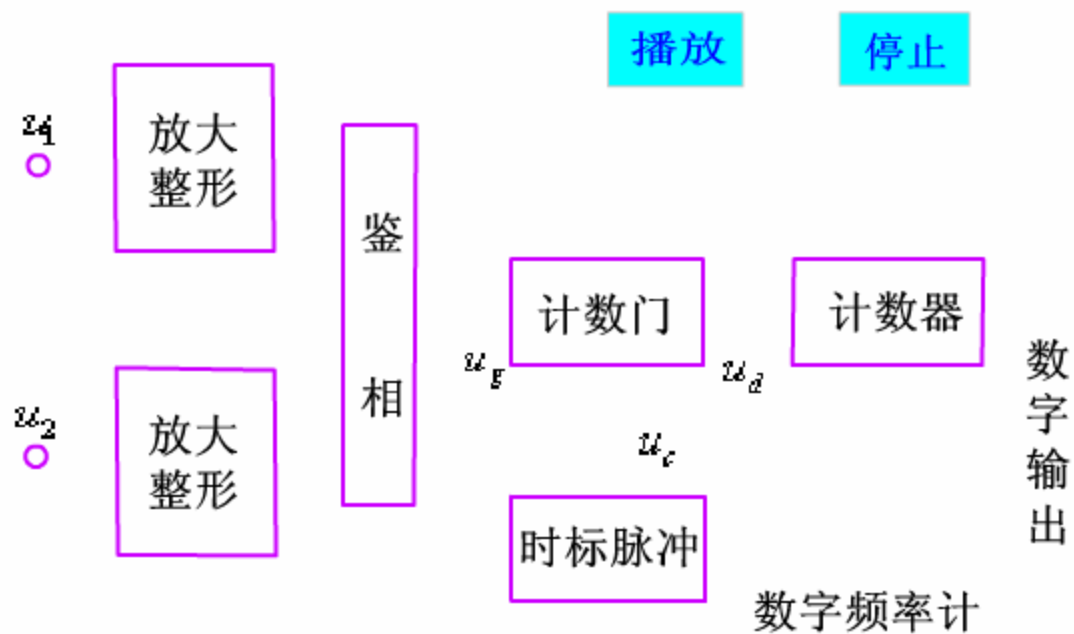
(a) 原理



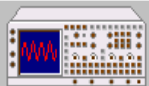
(b) 转换波形



相位一时间转换式相位计原理图



相位一时间转换式相位计原理图

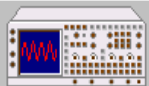


2.2 电压和电流的测量

1、电压的测量

- 电压的测量可分为两种方法
- 模拟和数字方法

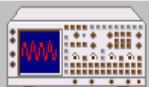
- 前者采用模拟式电压表显示测量结果，
- 后者采用数字电压表即以数字显示器显示测量结果。
- 两者的区别仅在于后者A/D转换器和数字显示器取代了前者的模拟显示电表部分。



工作原理

- 模拟式电压表
 - 优点：结构简单，价格便宜，测量频率范围较宽；
 - 缺点：是精度、分辨力较低，不便于与计算机组成自动测试系统。
-
- 数字式电压表则正好相反。

两者前端部分的工作原理基本相同。



1. 直流电压的测量

(1) 普通直流电压表

- 通常由动圈式高灵敏度直流电流表串联适当的电阻构成，如图2-6所示。

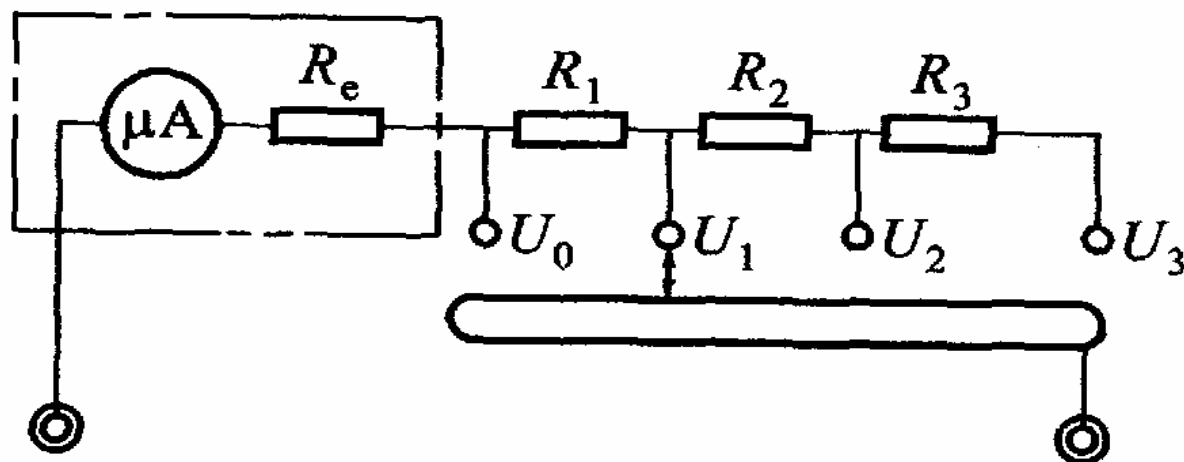
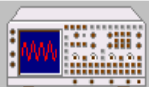


图2-8普通直流电压表电路

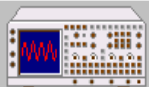


(2) 直流电子电压表

电压表: 在磁电式表头前加装跟随器 (以提高输入阻抗) 和直流放大器 (以提高测量灵敏度) 构成, 当要测量高直流电压时, 输入端接入高阻值电阻构成的分压电路。

电压表: 直流放大器的零点漂移影响电压灵敏度。

常采用斩波稳零式放大器或称调制式放大器抑制零点漂移, 使电子电压表能测量微伏级的电压。



(3) 直流数字电压表

- 用A / D转换器与数字显示器相连，即构成直流数字电压表，如图2-7所示。图中A/D转换器把直流电压转换成相应的数字量，送往数字显示器显示出来。
- 在A/D转换器前配转换电路，将被测参数转换成直流电压，就可构成测量该被测参数的数字仪表。

直流数字电压表是许多数字式电测仪表的核心部件，用途很广。

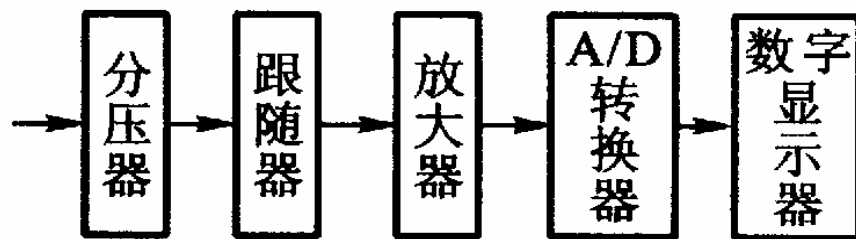
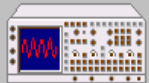


图 2 - 7 直流数字电压表框图



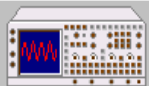
2. 交流电压的测量

(1) 交流电压

交流电压可以用峰值、平均值、有效值、波形系数以及波峰系数来表征。

(2) 交流电压的测量方法

- 检波-放大式
- 放大-检波式
- 外差式电压表



交流电压的测量

1、峰值测量

$$U_m = \frac{U_{P+} - U_{P-}}{2}$$

如果 $U_0 = 0$

则正、负幅值相等

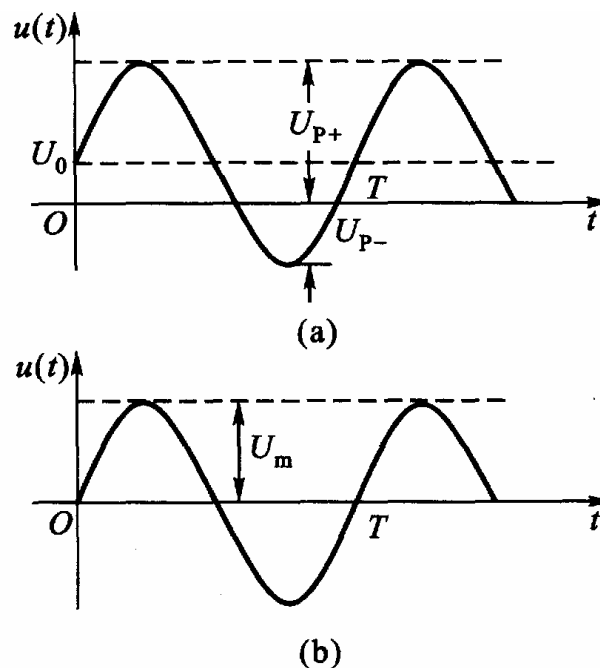
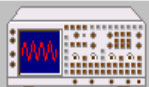


图 2-8 交流电压的峰值和幅值



交流电压的测量

②平均值

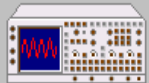
□ $u(t)$ 的平均值 \bar{U} 的数学定义为

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (2-41)$$

□ 按照这个定义，实质上就是被测电压的直流分量。

□ 全波整流平均值定义为

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$



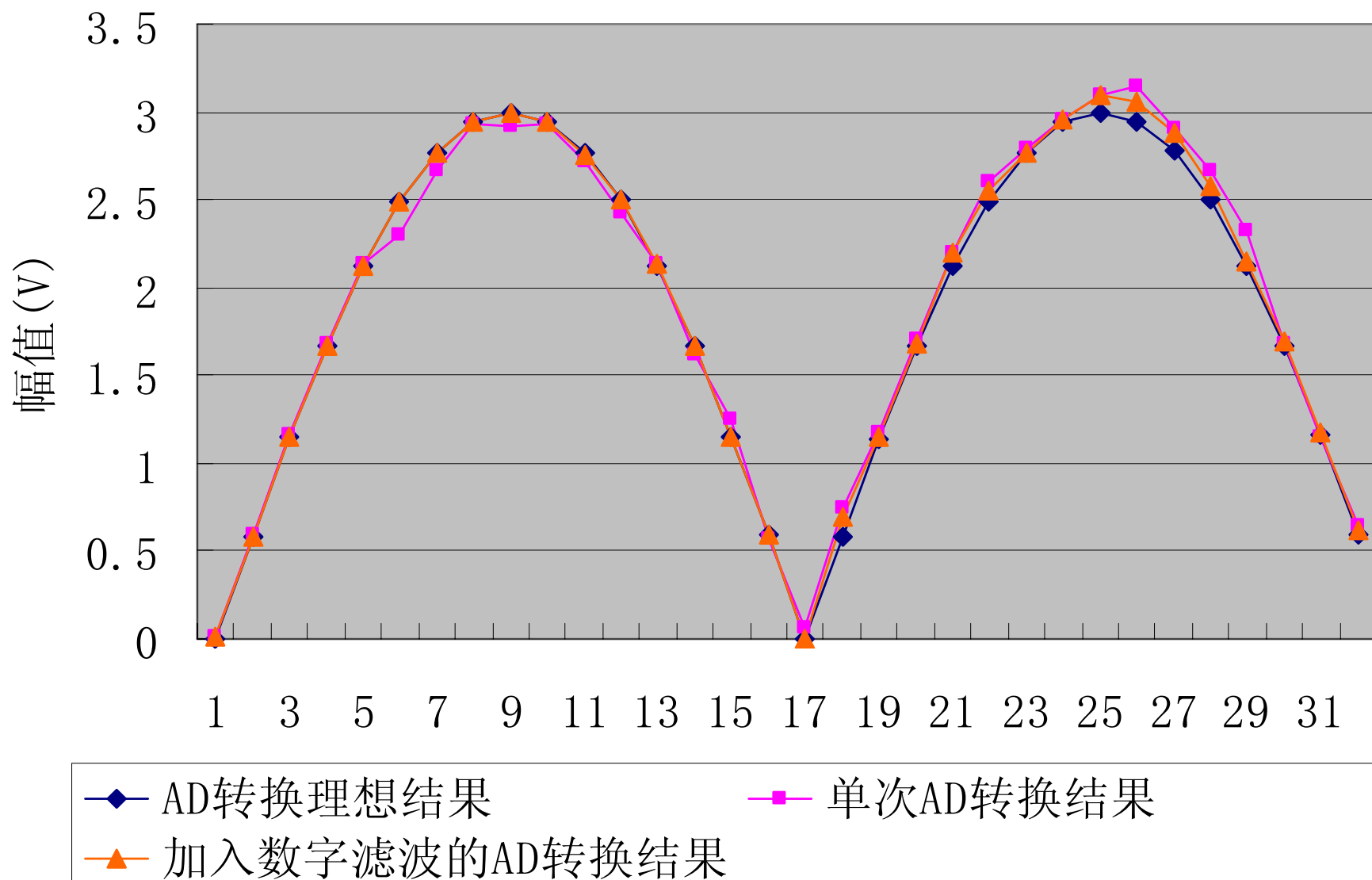
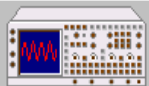
交流电压的测量

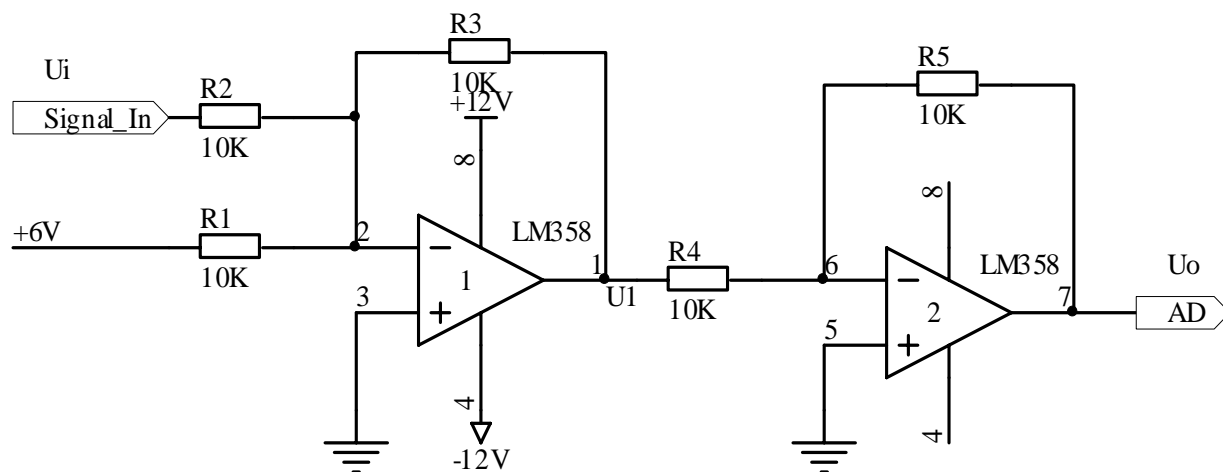
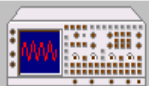
- ③有效值
- 一个交流电压和一个直流电压 U 分别加在同一电阻 R 上，若它们在一个周期内产生的热量相等，则交流电压有效值等于该直流电压 U ，可表示为

$$\int_0^T \frac{u^2(t)}{R} dt = \frac{U^2}{R} \cdot T$$

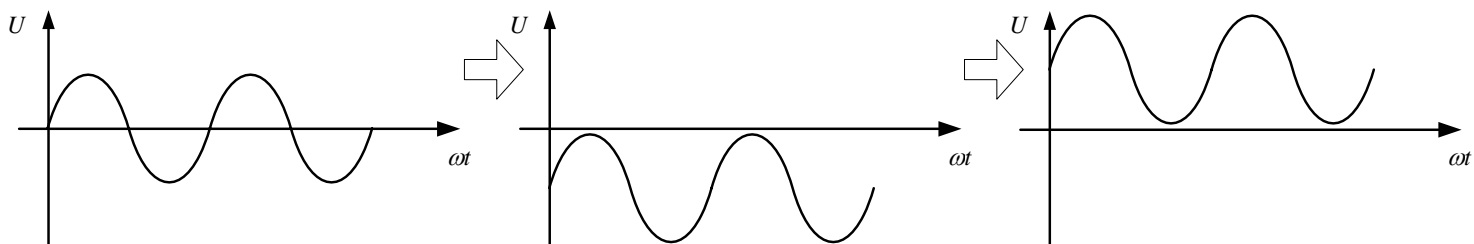
- 即

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{u^2(t)}{R} dt}$$

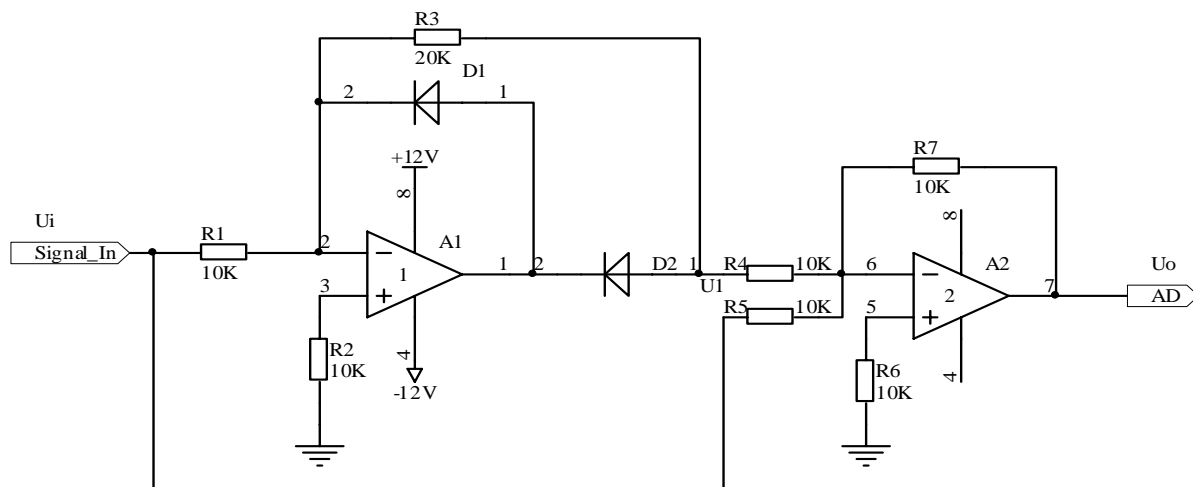
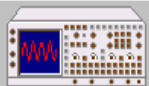




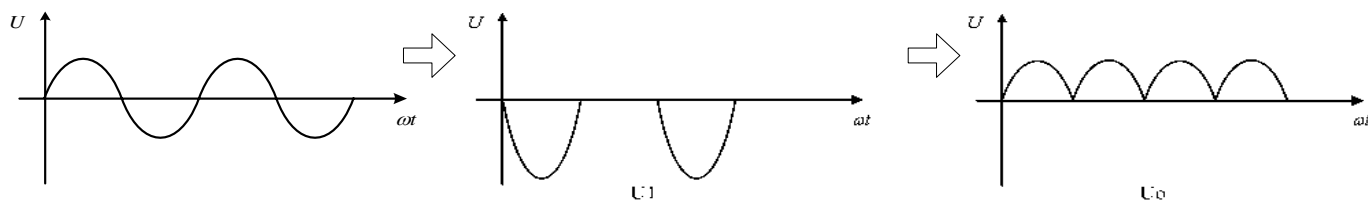
交流信号采集的原理图



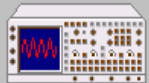
电压波形的调整



交流信号采集的原理图



电压波形的调整



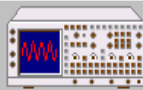
交流电压的测量

- ④ 波形系数、波峰系数
- 交流电压的波形系数 K_F 定义为该电压的有效值与平均值之比

$$K_F = \frac{U}{\overline{U}}$$

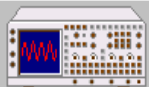
- 交流电压的波峰系数 K_P 定义为该电压的峰值与有效值之比

$$K_P = \frac{U_p}{U}$$



不同波形交流电压的参数

名称	波形图	波形系数 K_F	波峰系数 K_P	有效值 U	平均值 \bar{U}
正弦波		1.11	1.414	$A/\sqrt{2}$	$2A/\pi$
半波整流		1.57	2	$A/2$	A/π
全波整流		1.11	1.414	$A/\sqrt{2}$	$2A/\pi$
三角波		1.15	1.73	$A/\sqrt{3}$	$A/2$
方波		1	1	A	A
锯齿波		1.15	1.73	$A/\sqrt{3}$	$A/\sqrt{2}$
脉冲波		$\sqrt{\frac{T}{t_k}}$	$\sqrt{\frac{T}{t_k}}$	$\sqrt{\frac{t_k}{T}} \cdot A$	$\frac{t_k}{T} \cdot A$
白噪声		1.25	3	$\frac{A}{3}$	$\frac{A}{3.75}$

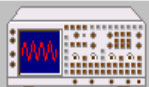


交流电压的相关概念

交流电压量值可以用峰值、有效值和平均值表征，但基于功率的概念，国际上一直以有效值作为交流电压的表征量。

当用正弦波的有效值定度的交流电压表测量电压时

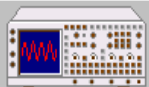
- ❑ 被测电压是正弦波，由表2—1很容易从有效值得知其峰值和平均值；
- ❑ 被测电压是非正弦波，需根据电压表读数和电压表所采用的检波方法，进行必要的波形换算，才能得到有关参数。



(2) 交流电压的测量方法

利用交流 / 直流 (AC / DC) 转换电路将交流电压转换成直流电压, 然后再接到直流电压表上进行测量。

- 根据AC / DC转换器的类型, 可分为检波法和热电转换法。
- 根据检波特性的不同, 检波法又可分成平均值检波、峰值检波、有效值检波等。



模拟式交流电压表大致可分成 下列三种类型

- 1、检波—放大式
- 2、放大—检波式
- 3、外差式电压表

检波—放大式电压表
先检波后放大，“高频
电压表”或“超高频电压
表”都属于这一类型。

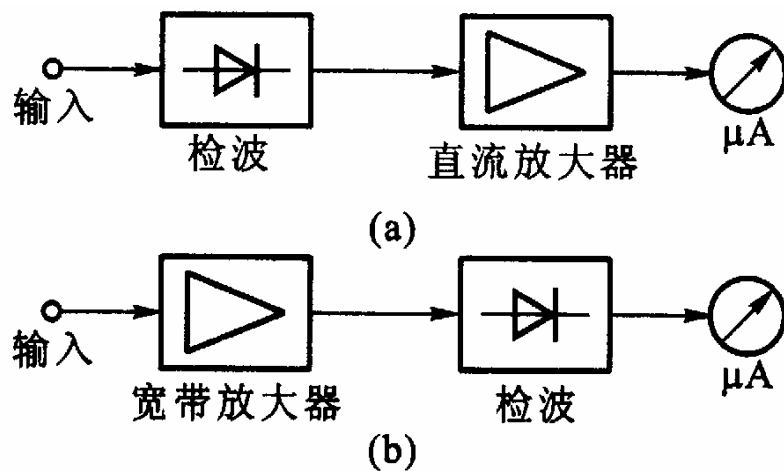
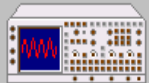
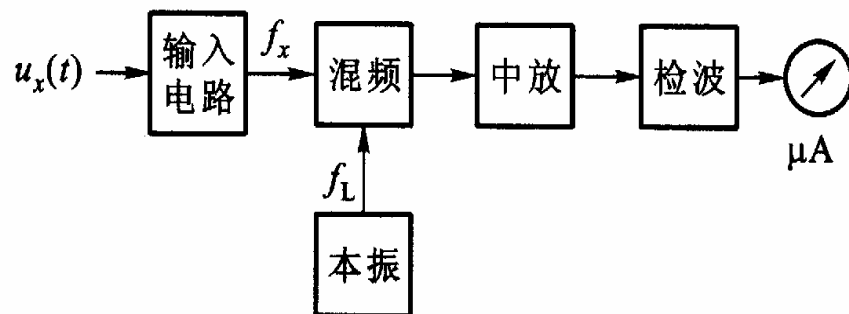


图 2-9 交流电压表类型

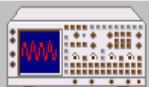


外差式电压表

检波一放大式电压表的灵敏度受检波器件非线性的限制。而放大一检波式电压表，由于宽带放大器增益和带宽的矛盾，也很难把频率上限提得很高，同时，两种测量方法的灵敏度都受到仪器内部噪声和外部干扰的限制。



外差式电压表



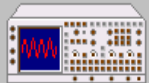
(3) 低频交流电压的测量

- 把测量低频（1MHz以下）信号电压的电压表称作交流电压表或交流毫伏表。
- 采用放大—检波式，检波器多为平均值检波器或有效值检波器，分别构成均值电压表或有效值电压表。

被测非正弦电压的有效值 U_{xrms}

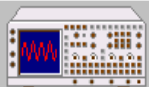
波形换算公式为

$$U_{xrms} = \frac{U_a \cdot K_F}{1.11} = 0.9 K_F \cdot U_0$$



(4) 高频交流电压的测量

- 高频交流电压的测量不采用放大-检波式（以避免高频测量受放大器通频带的限制），
- 采用检波-放大式或外差式电压表来测量。



3. 高电压测量技术

(1) 高压静电电压表

(2) 峰值电压表

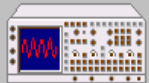
- **交流峰值电压表的工作原理可分为两类：**

- 利用整流电容电流来测量交流高压

- 利用电容器充电电压来测量交流高压

(3) 球隙测压器

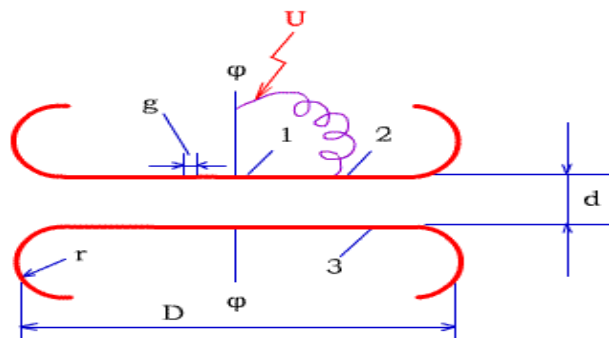
(4) 高压分压器



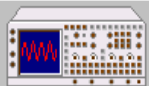
(1) 高压静电电压表

在两个特制的电极间加上电压 u ，电极间就会受到静电力 f 的作用， f 的大小与 u 的数值有固定的关系，测量 f 的大小或它所引起的可动极板的位移或偏转就能确定所加电压 u 的大小。

利用这一原理制成的仪表即为静电电压表，它可以用来测量低电压，也可以在高电压测量中得到应用。



静电电压表极板结构示意图



(2) 峰值电压表

为什么要测峰值

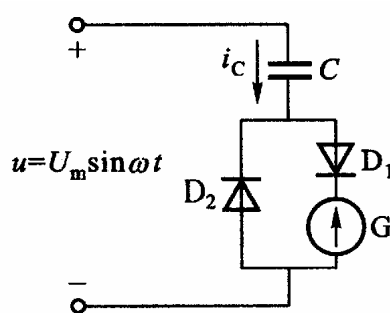
- 绝缘的击穿就仅仅取决于电压的峰值。
- 交流峰值电压表和冲击峰值电压表，通常均与分压器配合起来使用。

如何使用

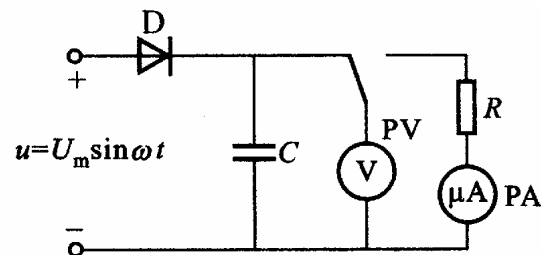
① 利用整流电容电流来测量交流高压

$$U_m = \frac{I_{av}}{2Cf}$$

图 (a)

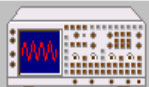


(a)



(b)

图 2-12 峰值电压表接线原理图

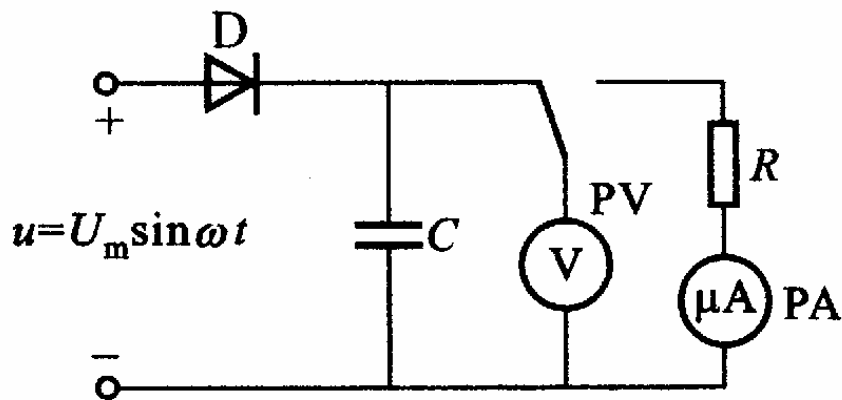


- ②利用电容器充电电压来测量交流高压

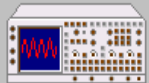
$$U_m = \frac{U_d}{1 - \frac{T}{2RC}}$$

静电电压
表PV

交流电压
的周期



(b)



(3) 球隙测压器

- 球隙测压器是唯一能直接测量高达数兆伏的高压峰值的测量装置。
- 由一对直径相同的金属球构成，测量误差约2% - 3%，能满足工程测试的要求。

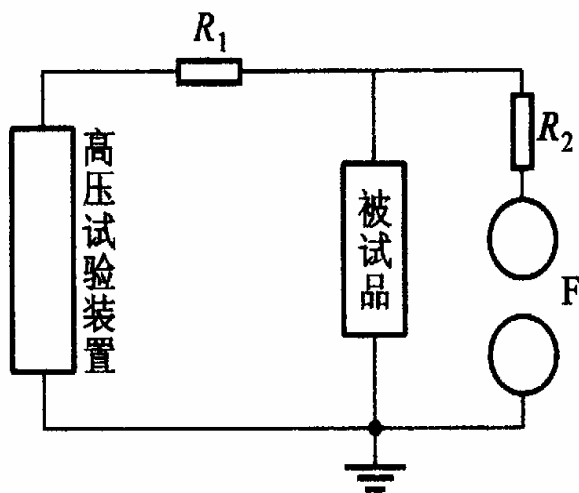
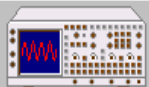


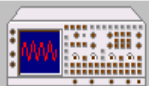
图 2-13 球隙测压器接入示意图

工作原理基于一定直径 (D) 的球隙在一定极间距离 (d) 时的放电 (击穿) 电压为一定值。已知直径 D 和极间距离 d ，球隙的放电电压可从理论上推得计算公式，所得结果往往不能满足测量精度的要求。通常通过实验的方法得出不同球隙的放电电压数据，被制成表格或曲线备用。



(4) 高压分压器

- 被测电压很高时，高压静电电压表无法直接测量，球隙测压器亦不行，球极的直径不能无限增大（一般不超过2m）。
- 用示波器测量电压的波形时，不能直接测。采用高压分压器分出一小部分电压，再用静电电压表、峰值电压表、高压脉冲示波器等测量仪器进行测量，是合理的。



分压器的技术要求

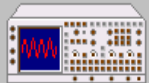
技术要求：

- 分压比的准确度和稳定性（幅值误差要小）；
- 分出的电压与被测高电压波形的相似（波形畸变要小）。

按用途分：为交流高压分压器、直流高压分压器和冲击高压分压器等；

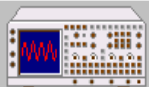
按分压元件分：为电阻分压器、电容分压器、阻分压器等三种类型。

每一分压器均由高压臂和低压臂组成。在低压臂上得到的是分给测量仪器的低电压。



2.2.2 电流的测量

- 1. 电流表直接测量法
- 2. 电流—电压转换法
- 3. 电流—磁场转换法
- 4. 电流互感器法



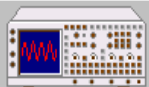
1. 电流表直接测量法

- 对于图 2-14 (a) 电路，被测电流实际值为

$$I_x = \frac{U}{R_0 + R_L} = \frac{U}{R}$$

信号源内阻

负载电阻



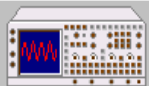
- 在电路中串接一个内阻为 r 的电流表，如图2-14(b)所示，则流过电流表的电流为

$$I'_x = \frac{U}{R + r} = \frac{U}{1 + r / R}$$

相对测量误差为

$$\delta = \frac{I'_x - I_x}{I_x} = - \frac{r}{R + r}$$

- 上式可见，为使电流表读数值逼近被测电流实际值，要求电流表的内阻 r 尽可能为零，即电流表内阻越小越好。



电流表测电流示意图

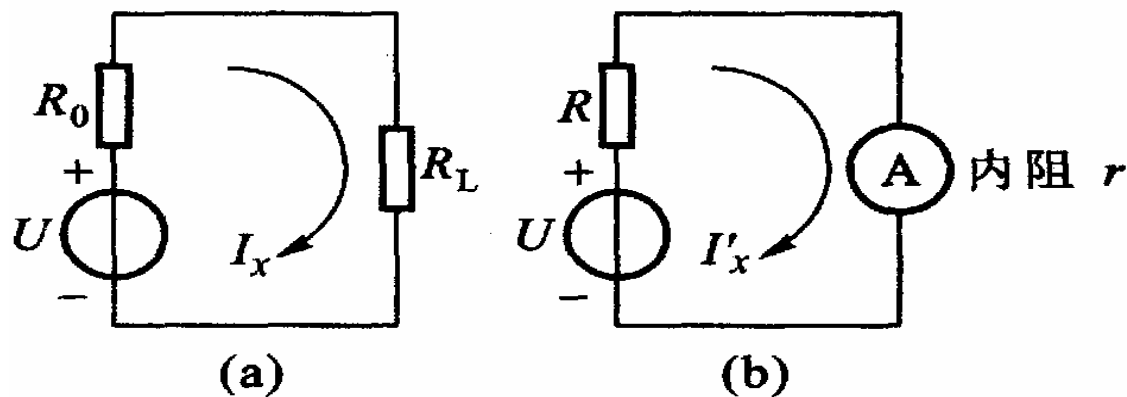
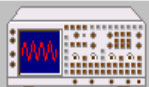


图 2-14 用电流表测量电流

$$I_x = \frac{U}{R_0 + R_L} = \frac{U}{R}$$

$$I'_x = \frac{U}{R + r} = \frac{U}{1 + r/R}$$



2. 电流-电压转换法

采用在被测电流回路中串入很小的标准电阻 r （称之为取样电阻），将被测电流转换为被测电压 U_x

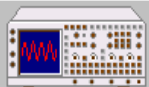
$$U_x = I'_x \cdot r$$

当满足条件 $r \ll R$ 时

•

$$U_x = I_x \cdot r$$

$$I_x = U_x / r$$



3. 电流-磁场转换法

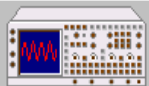
- 在不切断电路或被测电流太大的情况下，采取通过测量电流所产生的磁场的方法间接测得该电流的值。

图2-15为采用霍尔传感器的锥形电流表结构示意图。

冷轧硅钢片圆环的作用是将被测电流产生的磁场集中到霍尔元件上，提高灵敏度。

作用于霍尔片的磁感应强度 B 为

$$B = K_B \cdot I_x$$



4. 电流互感器法

- 采用电流互感器法可以不切断电路的情况下，测得电路中的电流。

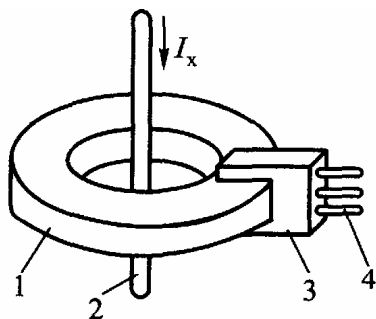


图 2-15 霍尔式钳形电流表

1—冷轧硅钢片圆环；2—被测电流导线；
3—霍尔元件；4—霍尔元件引脚

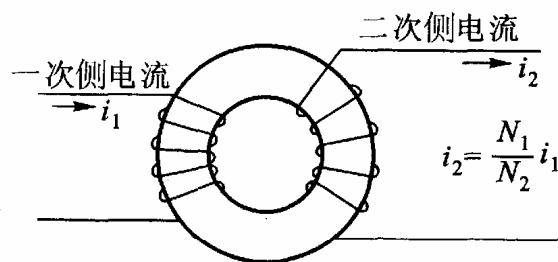


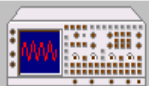
图 2-16 电流互感器

$$i_2 = -i_1 (N_1 / N_2)$$

一次侧电流

一次绕组匝数

二次绕组匝数



4. 电流互感器法 (b)

$$i_2 = i_1 (N_1 / N_2)$$

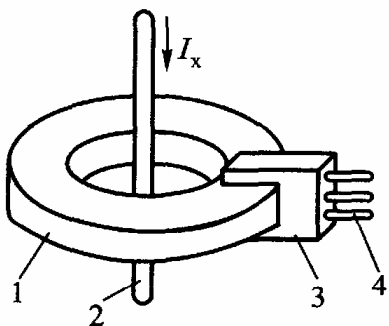


图 2-15 霍尔式钳形电流表
1—冷轧硅钢片圆环;2—被测电流导线;
3—霍尔元件;4—霍尔元件引脚

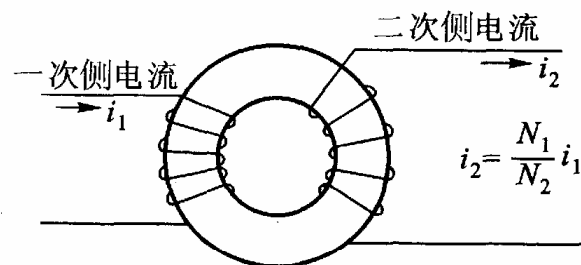
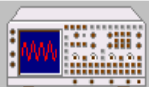
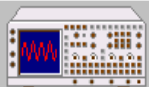


图 2-16 电流互感器



2.3 阻抗的测量

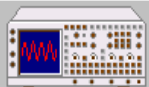
- 电阻 R 电感 L 和电容 C 是电路的3种基本元件。
- 在测量技术中，许多传感器如电阻式、电感式和电容式传感器是将被测量转换为电阻、电感或电容输出的。
- 本节研究和介绍 R 、 L 、 C 元件的阻抗及这三种元件参数的测量方法。



2.3.1 概述

- 1. **阻抗定义**
- 阻抗是描述一个元、器件或电路网络中电压、电流关系的特征参量，其定义为

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + jX = |Z|e^{j\theta} = |Z|(\cos \theta + j \sin \theta)$$



2. 电阻、电感和电容的等效电路

实际的电阻、电感和电容元件，存在着寄生电容、寄生电感和损耗。

图2-17是考虑了各种因素后，实际电阻 R 、电感 L 、电容 C 元件的等效电路

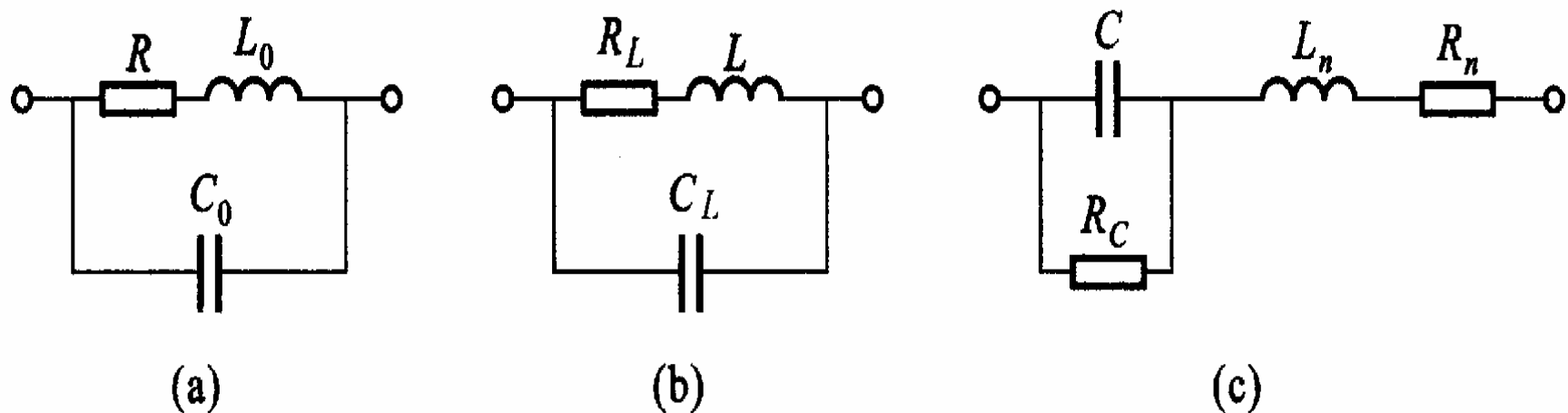
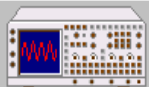


图2—17电阻 R 、电感 L 、电容 C 元件的等效电路



(1) 电阻

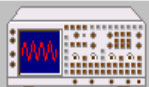
- 同一个电阻元件在通以直流电和交流电时测得的电阻值是不相同的。在高频交流下，须考虑电阻元件的引线电感和分布电容的影响。

在频率 f 下的等效阻抗为

$$\begin{aligned} Z_e &= \frac{(R + j\omega L_0) \frac{1}{j\omega C_0}}{R + j\omega L_0 + \frac{1}{j\omega C_0}} \\ &= \frac{R}{(1 - \omega^2 L_0 C_0)^2 + (\omega C_0 R)^2} + j\omega \frac{L_0 (1 - \omega^2 L_0 C_0) - R^2 C_0}{(1 - \omega^2 L_0 C_0)^2 + (\omega C_0 R)^2} \\ &= R_0 + jX_0 \end{aligned}$$

上式中 $\omega = 2\pi f$, R_0 和 X_0 分别为等效电阻分量和电抗分量，且

$$R_0 = \frac{R}{(1 - \omega^2 L_0 C_0)^2 + (\omega C_0 R)^2}$$



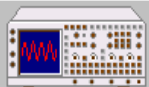
(2) 电感

- 电感元件的高频等效阻抗可参照式（2-63）来确定。

$$\begin{aligned} Z_e &= \frac{R_L}{(1 - \omega^2 L C_L)^2 + (\omega C_L R_L)^2} + j\omega \frac{L(1 - \omega^2 L C_L) - R_L^2 C_L}{(1 - \omega^2 L C_L)^2 + (\omega C_L R_L)^2} \\ &= R_e + j\omega L_e \end{aligned}$$

其中

$$L_e = \frac{L(1 - \omega^2 L C_L) - R_L^2 C_L}{(1 - \omega^2 L C_L)^2 + (\omega C_L R_L)^2}$$



(3) 电容

- R_c 是介质损耗的等效电阻。等效阻抗为

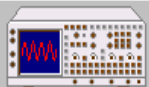
$$\begin{aligned} Z_e &= \frac{R_c}{1 + j\omega R_c} + j\omega L_n + R_n \\ &= \left(\frac{R_c}{1 + (j\omega R_c)^2} + R_n \right) - j\omega \left(\frac{CR_c^2}{1 + (j\omega R_c)^2} - L_n \right) \\ &= R_e + j\omega \left(\frac{1}{\omega^2 C_e} \right) \end{aligned}$$

式中, C_e 和 R_e 分别为电容元件的等效电阻和等效电容, 且

$$C_0 = \frac{1 + (\omega CR_c)^2}{\omega^2 (CR_c^2 - \omega^2 C^2 R_c^2 L_n - L_n)}$$

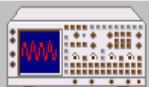
一般介质损耗甚小, 可忽略
(即 $R_e \rightarrow \infty$) 则上式简化为

$$C_e = \frac{C}{1 - \omega^2 CL_n}$$



2.3.2 直流电阻测量

- 1. 电表法
- 2. 电桥法
- 3. 直流小电阻的测法
- 4. 直流大电阻的测法



1. 电表法

- 电表法测量电阻的原理建立在欧姆定律之上，电压-电流表法（简称伏-安法）、欧姆表法及三表法是电表法的常见形式。

(1) 伏-安法

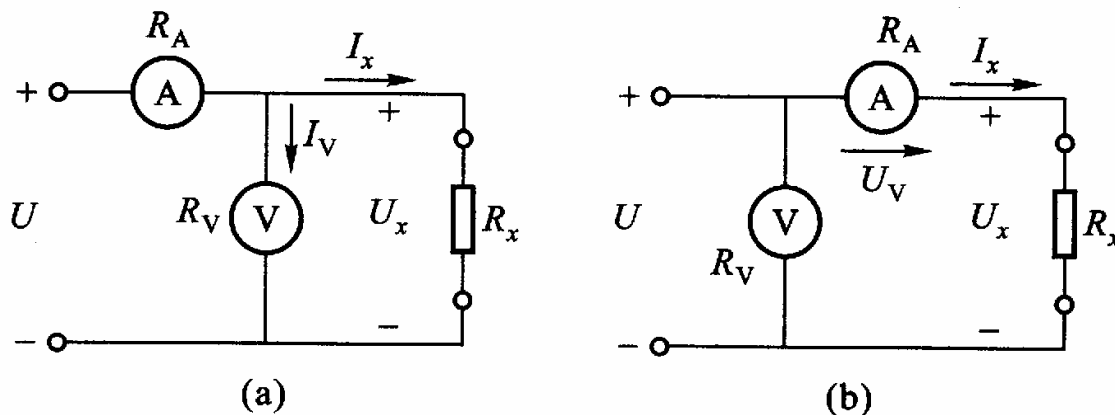
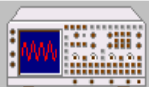


图2-18 伏-安法测量直流电阻



(2) 欧姆表法

- 如果 U_s 保持不变, 被测电阻 R_x 与通过电流表A的电流 I_A 成单值的反比关系, 而磁电式电流表指针的偏转角 θ 与通过的电流 I_A 成正比, 电流表指针的偏转角能反映 R_x 值大小。
- 如将电流表按欧姆值刻度, 就成为可直接测量电阻值 R_x 的仪表, 称为欧姆表。

$$U_0 = -\frac{R_x}{R_n} \cdot U_z$$

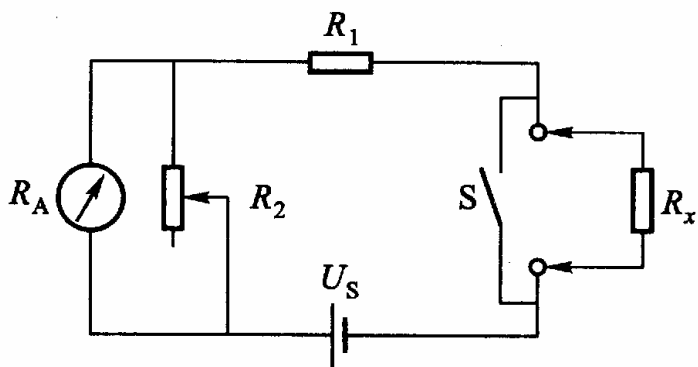


图 2-19 欧姆表测量电阻电路

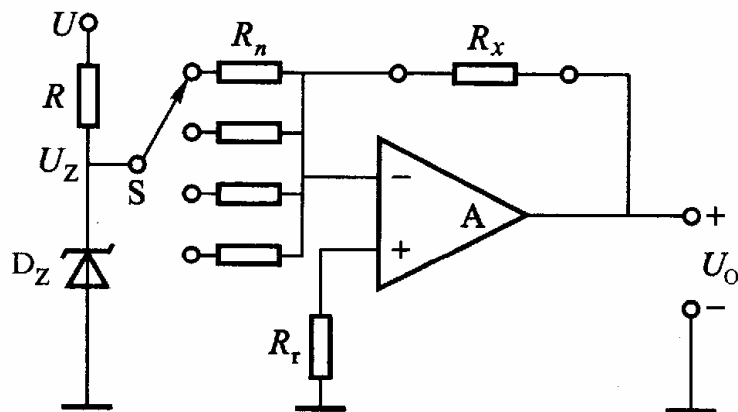
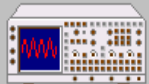


图 2-20 欧姆 - 电压变换器原理电路



2. 电桥法

- 测量直流电阻最常用的是电桥法。电桥分为直流电桥和交流电桥两大类，直流电桥主要用于测量电阻。

检流计G中无电流，由电桥平衡条件

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_x$$

可得被测电阻

$$R_x = R_1 \cdot R_3 / R_2$$

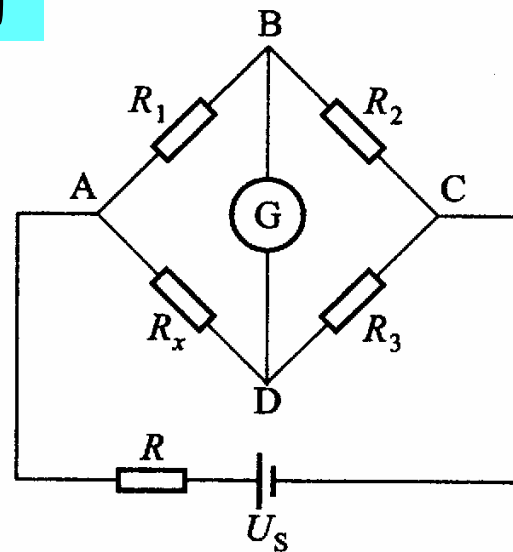
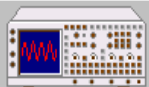


图2-21 直流单电桥原理电路图



3. 直流小电阻的测法

- (1) 直流双电桥
- (2) 数字微欧计
- (3) 脉冲电流测量法



直流双电桥又称开尔文电桥，它是用来测量小电阻的一种比较仪器。

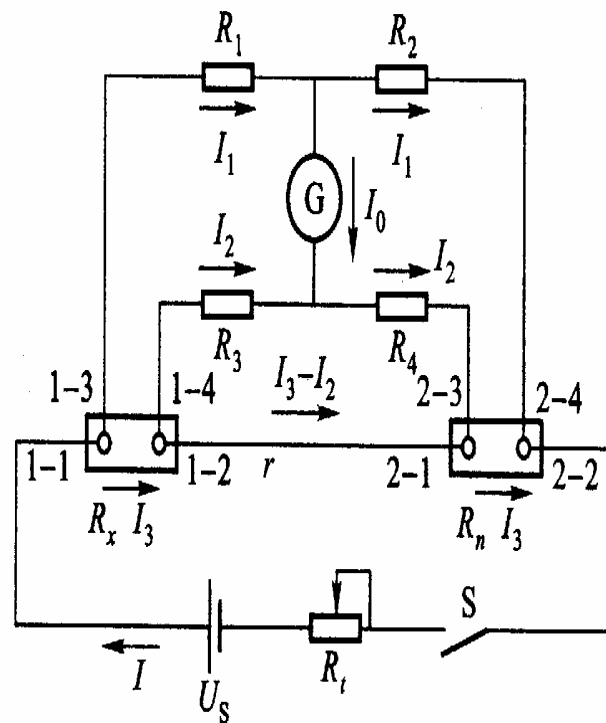
测量时调节桥臂电阻使 $I_n = 0$

使电桥达到平衡

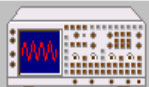
$$\begin{cases} \mathbf{I}_1 \mathbf{R}_1 = \mathbf{I}_2 \mathbf{R}_3 + I_3 R_x \\ \mathbf{I}_1 \mathbf{R}_2 = \mathbf{I}_2 \mathbf{R}_4 + I_3 R_n \\ (\mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_2) \mathbf{r} = \mathbf{I}_2 (\mathbf{R}_3 + R_4) \end{cases}$$

解此方程组可得

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_n}{R_2} + \frac{r}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right) R_4$$

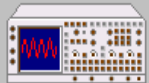


直流双电桥原理电路



(2) 数字微欧计

- 用直流双电桥测量小电阻有操作不方便，费时的缺点，且测量精度除与仪器有关外，还与操作人员的熟练程度有关。
- 近些年研究发展起来的数字微欧计，是一种测量低值电阻的数字式仪表。

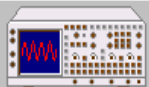


数字微欧计

基本原理是：利用直流恒流源在被测电阻上产生直流电压降外，然后通过电压放大和A / D转换器变为数字显示的电阻值。

在测量过程中，采用“四端子”（电流端子、电位端子）测量法，消除引线和接触电阻带来的误差。

数字微欧计具有操作简单，省时，数显，对操作人员要求不高等优点。

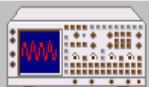


(3) 脉冲电流测量法

为什么？

如果采用电流—电压降法进行测量小电阻，则因压降会很小，信噪比很低，获得高测量精度很困难。

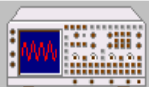
加大测量电流，增加被测电阻 R_x 上的电压降，降低对测量压降仪器的要求，但被测电阻的温度也就随之升高，阻值亦相应变化，这种现象称为电阻的负载效应。



脉冲电流测量法

脉冲大电流测量小电阻的原理是：由控制电路控制脉冲电流源的数值和启、停时间，放大器在电流源开启时间内工作，放大小电阻两端的电压降，计算机通过A/D转换接口读入压降值并计算出小电阻值。

结论：脉冲电流法可以提高测量小电阻的精度、分辨力和测量速度。



4. 直流大电阻的测法

(1) 冲击电流计法

$$u_c = U_s (1 - e^{-\frac{t}{R_x C}})$$

$$Q_c = Cu_c = CU_s (1 - e^{-\frac{t}{R_x C}}) \quad (2-76)$$

由于 $t/R_x C$ 很小，取 $e^{-\frac{t}{R_x C}}$

的级数展开式的前两项已经足够，故有

$$Q_c = CU_s - CU_s \left[1 - \left(-\frac{t}{R_x C} \right) \right] = \frac{U_s \cdot t}{R_x}$$

即：
$$R_x = \frac{U_s \cdot t}{Q_c \cdot \alpha_m}$$

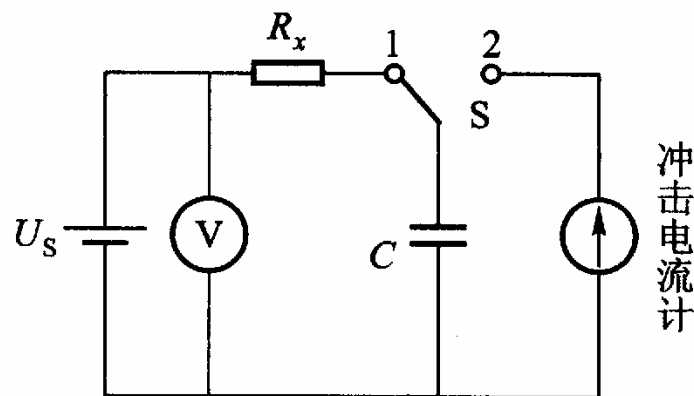
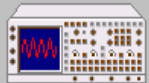


图 2-23 冲击法测量大电阻原理



(2) 高阻电桥法

高阻电桥法利用如图2-24所示的六臂电桥，通过电路变换并结合四臂电桥的基本平衡条件就可推得关系式为

$$R_x = \frac{R_2 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_5 + R_2 R_4 R_5 + R_2 R_4 R_6}{R_3 R_6}$$

高阻电桥测量范围为 $10^8 \sim 10^{17} \Omega$ 。被测电阻值小于 $10^{12} \Omega$ 时，测量误差为0.03%，被测电阻值为 $10^{13} \Omega$ 时误差为0.1%。这种电桥的供电电压在50 ~ 1000 V范围。

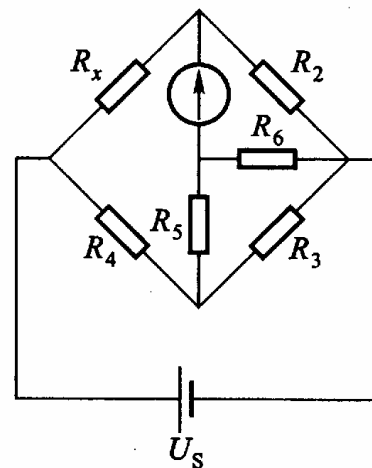
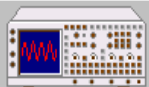


图 2-24 高阻电桥测量原理



2.3.3 交流阻抗及L、C的测量

- 1. 交流阻抗电桥
- 2. 变量器电桥
- 3. 数字式阻抗测量仪

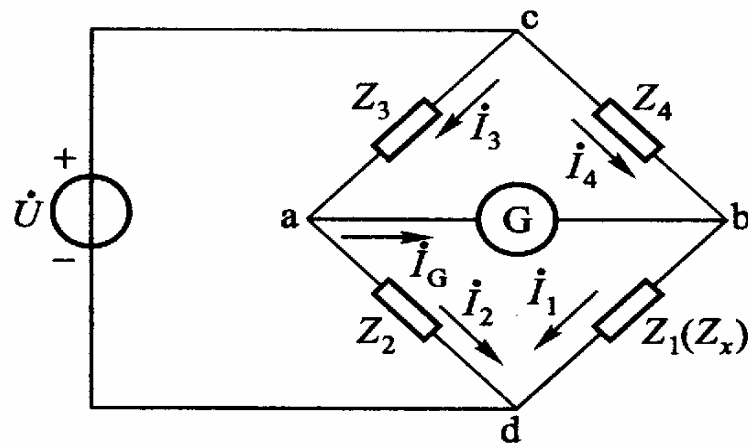
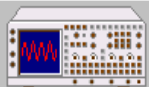
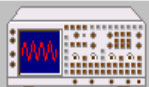


图 2-25 交流四臂电桥



(1) 电桥平衡条件

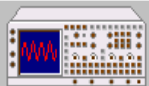
- 电桥平衡必须同时满足模平衡和相位平衡两个条件。
- $$\begin{cases} |Z_1| \cdot |Z_3| = |Z_2| \cdot |Z_4| \\ \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \end{cases}$$
- 在交流情况下，电桥四个桥臂阻抗的大小和性质必须按一定条件配置，否则可能不能实现电桥平衡。
- 在实用电桥中，为了使结构简单，调节方便，通常有两个桥臂采用纯电阻。



(2) 电桥电路及元件参数的测量

- 当选择 R_2 和 C_2 为可调元件时，被测量的参数和可以分别读数。
- 串联电容电桥适于测量损耗小的电容。

$$\begin{cases} R_x = \frac{R_4}{R_3} R_2 \\ C_x = \frac{R_3}{R_4} C_2 \end{cases}$$



2. 变量器电桥

交流四臂电桥适用于在低频时测量交流电阻、电感、电容等。

- 变量器电桥可用于高频时的阻抗测量。
- 变量器电桥有变压式、变流式和双边式三种结构，双边式是前两种结构形式的组合。

电桥平衡时可得

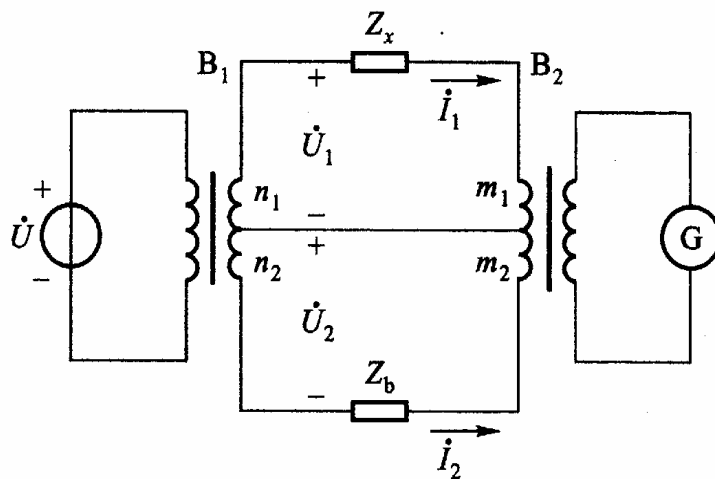
$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dot{U}_1 / Z_x \\ \dot{I}_2 = \dot{U}_2 / Z_b \\ \dot{U}_1 / \dot{U}_2 = n_1 / n_2 \end{cases}$$

可解得

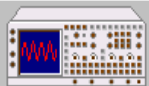
$$Z_x = \frac{n_1 m_1}{n_2 m_2} Z_b$$

电桥平衡时G指零得

$$\dot{I}_1 \cdot m_1 - \dot{I}_2 \cdot m_2 = 0$$



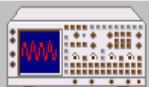
双边式变量器电桥



变量器电桥特点及应用

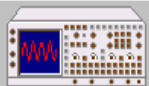
变量器电桥的特点是：匝数比可以做得很准确，不受温度、老化等因素的影响；灵敏度高；收敛性好；桥路所用标准元件少。

- **变量器电桥得到广泛应用**
- 工作频率达几百兆赫兹；
- 电阻量程为 $10^{-4} \sim 10^9 \Omega$ ，
- 精度可达 $\pm (0.01 - 0.001) \%$ ；
- 电容量程为 $10^{-8} \sim 10^4 \mu F$ ，
- 精度最高可达 $\pm 1 \times 10^{-7}$ ，
- 电感量程为 $10^{-2} \mu H \sim 10^5 \mu H$ ，
- 精度 $\pm 0.01 \%$ 。



3. 数字式阻抗测量仪背景

- 传统的阻抗测量仪是模拟式的。主要采用电桥法、谐振法和伏安法进行测量，缺点较多。
- 对阻抗的测量要求既精确又快速，并实现自动测量和数字显示。
- 高性能微处理器的应用，阻抗测量仪向数字化、智能化方向发展。



(1) 矢量阻抗测量原理

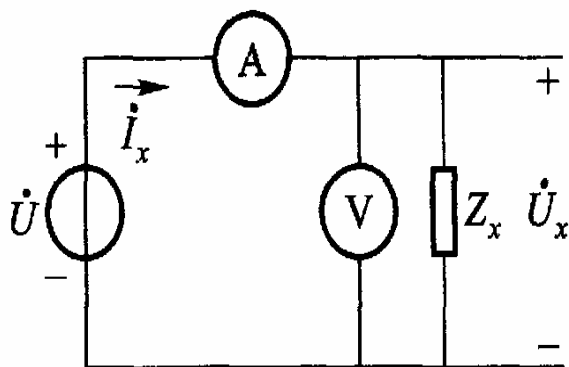
- 带有微处理器的数字式阻抗测量仪多采用矢量阻抗测量法，即从阻抗的基本定义出发，根据被测阻抗元件两端的电压矢量和流过被测阻抗元件的电流矢量计算出被测阻抗元件的值。

(a图) 求得被测阻抗

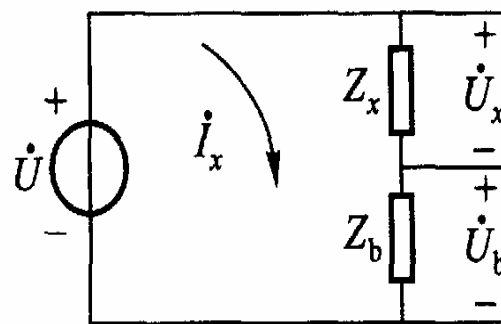
$$Z_x = \frac{\dot{U}_x}{\dot{I}_x} = R_x + jX_x$$

(b图) 所示，则可得

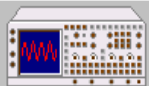
$$Z_x = \frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_b} Z_b$$



(a) 交流电压电流表法测阻抗



(b) 引入标准阻抗测试原理



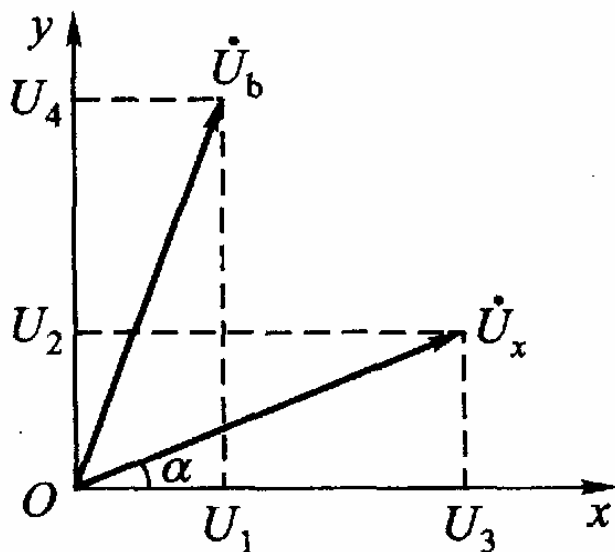
矢量阻抗测量

知道两个电压矢量在直角坐标轴上的投影，则经过标量运算，就可求出被测阻抗 Z_x 。

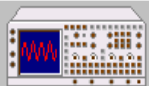
图中

$$\begin{cases} \dot{U}_x = U_3 + jU_2 \\ \dot{U}_b = U_1 + jU_4 \end{cases}$$

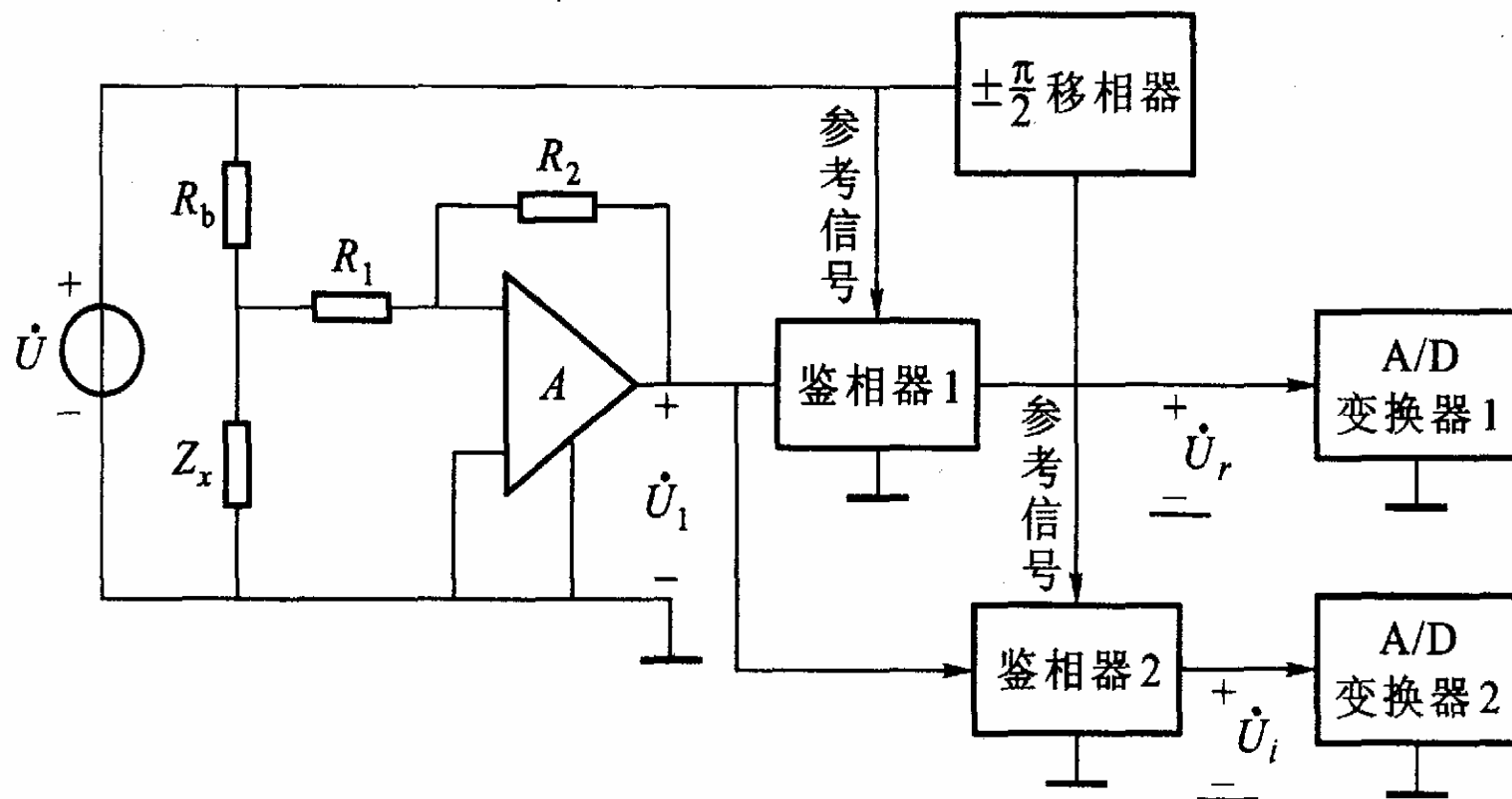
用标准电阻 R_b 代替 Z_b ，则

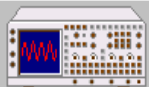


$$\begin{aligned} Z_x &= \frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_b} R_b = \frac{U_3 + jU_2}{U_1 + jU_4} R_b \\ &= R_b \left(\frac{U_1 U_3 + U_2 U_4}{U_1^2 + U_4^2} + j \frac{U_1 U_2 - U_3 U_4}{U_1^2 + U_4^2} \right) \end{aligned}$$



(2) 数字式阻抗测量仪组成





数字式阻抗测量仪

- 图中的鉴相器包含乘法器和低通滤波器，鉴相器1的参考信号就是信号源，而鉴相器2的参考信号比有 $\pi/2$ 的相移。
- 鉴相器1和鉴相器2可以分离出和成比例的同相电压分量和正交电压分量，经A/D转换后，即可实现被测阻抗的数字化测量。

图中被测阻抗

$$Z_x = R_x + jX_x$$

令

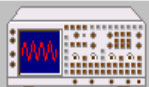
$$R_b \gg |R_x + jX_x|$$

由图可知

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= K \cdot \frac{R_x + jX_x}{R_b + R_x + jX_x} \dot{U} \approx \frac{K\dot{U}}{R_b} (R_x + jX_x) \\ &= \dot{U}_{1r} + \dot{U}_{1i}\end{aligned}$$

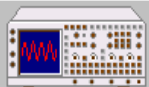
整理可得

$$R_x = \frac{\dot{U}_{1r}}{K\dot{U}} R_b \quad L_x = \frac{\dot{U}_{1i}}{\omega K\dot{U}} R_b \quad C_x = \frac{K\dot{U}}{\omega R_b \dot{U}_{1i}}$$



第2章 电参量测量技术

- 1. 常用的测频方法有哪些，各有什么特点？
- 2. 通用电子计数器主要由哪几部分组成？画出其组成框图。
- 3. 简述计数式频率计测量频率的原理，说明这种测频方法测频有哪些测量误差。对一台位数有限的计数式频率计，是否可无限制地扩大闸门时间来减小 f 误差，提高测量精确度？
- 4. 用图2—2所示通用计数器测量被测信号频率 f ，已知标准频率 $f=1\text{MHz}$ ，准确度为 2×10^{-7} ，采用 $m=10^3$ 分频，若 $f_n=10\text{ kHz}$ ，试分别计算测频与测周时的最大相对误差 $\Delta f/f$ 。
- 5. 已知中界频率为 f_0 ，待测频率为 f_x ，试分析说明在何种条件下应采取直接测频法测量 f_n ，何种条件下应采取测周法测量 f_n 。
- 6. 测量相位差的方法主要有哪些？简述它们各自的特点。
- 7. 直流电压的测量方法有哪些？



- 8. 交流电压的测量方案有哪些?
- 9. 用全波整流均值电压表分别测量正弦波、三角波和方波,若电压表指示值均为10 V,问3种波形被测电压的有效值各为多少?
- 10. 为什么不能用单电桥测量低值电阻?试分析双电桥为什么适用于测量低值电阻。
- 11. 电流的测量方案有哪些?
- 12. 为什么交流电桥的桥臂阻抗必须按一定的原则匹配才能使电桥平衡?如果三个桥臂都是电阻,则第四个桥臂应是怎样的阻抗,交流电桥才能平衡?
- 13. 设如图2-25所示的交流电桥平衡时有下列参数: Z_3 为 $R_3=2\,000\,\Omega$ 与 $C_3=0.5\,\mu\text{F}$ 相并联, Z_4 为 $R_4=1000\,\Omega$ 与 $C_4=1\,\text{pF}$ 相串联, Z_2 为电容 $C_2=0.5\,\text{pF}$, 信号源角频率 $\omega=10^3\text{rad/s}$, 求阻抗式的元件值。